

Simulação tridimensional de escoamentos fluviais em regime não uniforme

Copyright em nome Frederico Mota Antunes, estudante da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A presente dissertação culmina um trajecto na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, o fim do Mestrado Integrado em Engenharia Civil. A conclusão desta etapa não teria sido possível sem ajuda, apoio, motivação e intervenção de alguns amigos, familiares e colegas, a eles o meu muito obrigado.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor João Leal, pela total disponibilidade de me acompanhar neste trabalho, pela motivação, amizade e por último mas não menos importante pelos conhecimentos transmitidos.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia agradeço a disponibilização dos dados através do projecto PTDC/ECM/70652/20066, o qual permitiu obter dados experimentais.

À engenheira Marina Filonovich agradeço a sua ajuda e enorme prontidão demonstrada no desenvolvimento deste projecto. Foi fundamental na minha compreensão do programa Ansys. A ela um muito obrigado.

Agradeço também aos meus pais todo o carinho, amor e motivação por ter chegado onde cheguei, sem o vosso apoio não teria sido possível.

À minha namorada pela sua amizade, compreensão, amor e acima de tudo por nunca ter deixado de acreditar em mim e fazer-me sempre querer ir mais além.

A todos os meus amigos um grande obrigado pelo seu contributo neste percurso académico.

Resumo

A presente dissertação tem como objectivo melhorar a compreensão no estudo de cheias em rios, em particular ajudar na criação de mapas de risco de inundação, quantificando a distribuição de caudais, velocidades e cotas de água. Para isso foi usado o programa ANSYS® CFX, recorrendo a análises numéricas para analisar os escoamentos turbulentos, tridimensionais, incompressíveis e isotérmicos.

Em situações de cheias, a capacidade de vazão do leito principal dos rios não permite que o escoamento se faça apenas nesse leito, mas também nos campos adjacentes, denominados por leitos de cheia. Assim sendo, a configuração característica dos rios em situações de cheia é a de um leito com secção composta. O escoamento no leito principal entra em interacção com o escoamento no(s) leito(s) de cheia, tipicamente de menor profundidade e consequentemente mais lentos. As características destes escoamentos não se encontram suficientemente definidas, principalmente devido à referida interacção entre o escoamento nos leitos. Este estudo foca-se numa modelação de canais de secção composta e respectiva simulação de escoamentos em regime uniforme e não uniforme, muito semelhante aos comportamentos da grande parte de rios e ribeiras e que se caracteriza por um complexo campo turbulento tridimensional. Pretende-se estudar os mecanismos envolvidos nos escoamentos deste tipo de canais, bem como a interacção entre o leito principal e o leito de cheias. A componente numérica deste estudo inclui desde recolha e tratamento de dados a partir de simulações computacionais no que se refere à estrutura turbulenta do escoamento e suas alterações para diferentes alturas relativas, abrangendo situações de regime uniforme e regime não uniforme. Foi usado um modelo isotrópico $k-\varepsilon$ cujos resultados foram posteriormente comparados com resultados obtidos experimentalmente no Departamento de Hidráulica e Ambiente, Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Palavras chave: canais de secção composta; escoamento uniforme e não uniforme; camada de mistura; modelação 3D; CFD.

Abstract

This thesis aims to improve understanding in the study of floods in rivers, particularly the creation of maps of flood risk, quantifying the distribution of flow rates, velocities and water heights. For that purpose was used the program ANSYS® CFX, using numerical analysis to analyze the turbulent flow, three- dimensional, incompressible and isothermal.

In flood situations, the flow capacity of the main bed of the rivers does not allow the flow is made only in bed but also in adjacent fields, called for full beds. Therefore, the characteristic configuration of the rivers in flood situations is to bed with a compound section. The flow enters the main channel flow interaction with the(s) bed(s) full, typically shallower and therefore slower. The characteristics of these flows are not sufficiently defined, mainly due to that interaction between the flows in the beds.

This study focuses on a modeling compound channel section and its simulation of flow under uniform and non-uniform regime, much like the behavior of most rivers and streams and is characterized by a complex three-dimensional turbulent field. Since the aim was to study the mechanisms involved in this type of flow channels, as well as the interaction between the main bed and the water meadow.

The numerical component included the collection and processing of data from computer simulations in relation to the structure of turbulent flow and its changes related to different heights, including situations of uniform rules and rules are not uniform. The simulations obtained with an isotropic $k-\epsilon$ model were compared with simulated results that were obtained experimentally at the Department of Hydraulics and Environment, Pavilion of Fluvial Hydraulics at the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC).

Keywords: compound channel, uniform and non-uniform flow; mixing layer; 3D modeling; CFD.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objectivo	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Base teórica	3
2.1.1	Introdução	3
2.1.2	Secção composta	4
2.1.3	Camada Limite	6
2.1.4	Camada de Mistura	7
2.1.5	O papel dos modelos de turbulência	8
2.2	Sistema de equações do modelo $k-\epsilon$	9
2.2.1	Equações de Navier-Stokes	9
2.2.2	Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)	12
2.2.3	Modelos de fecho de turbulência	13
2.3	Simulações 3D de escoamentos em canais de secção composta	15
3	Aplicações Computacionais de Dinâmica dos Fluidos (CFD)	19
3.1	Introdução	19
3.2	Base de código	20
3.2.1	Pré-processador	20
3.2.2	Algoritmos/ <i>Solver</i>	21
3.2.3	Pós-processador	21

3.3	Malhas	22
3.4	Condições de fronteira	24
4	Descrição da simulação/modelação e validação do modelo	27
4.1	Introdução	27
4.2	Descrição da simulação/modelação	28
4.2.1	Geometria	28
4.2.2	Malha	29
4.2.3	Processador(CFX)	30
4.3	Validação do Modelo	31
5	Simulação de escoamentos uniformes	35
5.1	Introdução	35
5.1.1	Tratamento e análise de dados	36
5.2	Resultados da simulação RU	36
5.2.1	Evolução longitudinal de caudais e alturas	36
5.2.2	Desenvolvimento da camada limite	37
5.2.3	Comparação do modelo numérico com experimental	38
5.2.4	Desenvolvimento da camada de mistura	39
5.2.5	Correntes secundárias	39
5.2.6	Análise da estrutura turbulenta	40
5.2.7	Avaliação da performance do modelo	42
6	Simulação de escoamentos não uniformes	51
6.1	Introdução	51
6.2	Resultados da simulação RNU -19%	52
6.2.1	Evolução longitudinal de caudais	52
6.2.2	Desenvolvimento da camada limite	53
6.2.3	Comparação do modelo numérico com experimental	55
6.2.4	Desenvolvimento da camada de mistura	55
6.2.5	Correntes secundárias	57
6.2.6	Análise da estrutura turbulenta	57

6.2.7	Avaliação do modelo	58
6.3	Resultados das simulações RNU +19%, +42% e +60%	66
6.3.1	Evolução de caudais	66
6.3.2	Desenvolvimento da camada limite	69
6.3.3	Comparação do modelo numérico com experimental	71
6.3.4	Desenvolvimento da camada de mistura	71
6.3.5	Correntes secundárias	72
6.3.6	Análise da estrutura turbulenta	74
6.3.7	Avaliação do modelo	74
6.4	Discussão sobre o efeito da transferência de massa	75
7	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	99
7.1	Conclusões	99
7.2	Propostas para trabalhos futuros	101

Lista de Tabelas

6.1	Secções transversais a comparar entre resultados numéricos e experimentais	51
6.2	Velocidades iniciais de simulação	52

Lista de Figuras

1.1	Rio Acari, um do maiores cursos de água do Rio de Janeiro (Brasil 2011).	1
2.1	Exemplo de um canal de secção composta, Pinto (2010)	4
2.2	Estrutura turbulenta de um escoamento de secção composta, adaptada de Shiono & Knight (1991)	5
2.3	Esquema de vórtices de eixo vertical na região de interfaces, adaptado de Prooijen <i>et al.</i> (2005)	6
2.4	Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma superfície sólida, adaptado de Massey (2002)	7
2.5	Esquema de desenvolvimento da camada de mistura, adaptada de Nijs (2003)	8
2.6	Série temporal de velocidades instantâneas $u(t)$ para um intervalo de tempo t e a sua decomposição em média temporal e flutuações instantâneas, adaptada de Campbell (2005)	13
2.7	Campos de escoamentos para canais de leito de cheia com baixa e elevada profundidade, adaptada de Nezu <i>et al.</i> (1999)	17
3.1	Modelo de projecto	20
3.2	Malha adoptada	24
4.1	Secção transversal do canal adaptada de Tiago (2011)	28
4.2	Ambiente de trabalho do programa ANSYS®	28
4.3	Modelação do canal no Geometry do ANSYS®	29
4.4	Número de elementos presentes na malha	30
4.5	Modelação da malha no Mesh do ANSYS®	30
4.6	Modelação das condições de escoamento no CFX-Pre do ANSYS®	31
4.7	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RU	32
4.8	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU -19%	32

4.9	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +19%	32
4.10	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +42%	33
4.11	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +60%	33
4.12	Isolinhas correspondentes à velocidade média U para X4000 (<i>outlet</i>) e (<i>inlet</i>) para RU	34
4.13	Isolinhas correspondentes à velocidade média U para X4000 (<i>outlet</i>) e (<i>inlet</i>) para RNU -19%	34
5.1	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RU	36
5.2	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RU	37
5.3	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para o leito de cheia para RU	37
5.4	Perfis verticais de velocidades para RU	38
5.5	Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos	39
5.6	Distribuição transversal das tensões de arrastamento, dados experimentais e numéricos	41
5.7	Tensões de Reynolds no plano vertical e horizontal, adaptada de Babaeyan-Koopaei <i>et al.</i> (2002)	42
5.8	Performance do modelo numérico com modelo experimental para secções X3000, X5000, e X7500 em regime uniforme	43
5.9	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos no regime uniforme	44
5.10	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais no regime uniforme	45
5.11	Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos no regime uniforme	46
5.12	Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos no regime uniforme	47
5.13	Tensões de Reynolds XY para regime uniforme	48
5.14	Tensões de Reynolds XZ para regime uniforme	49
5.15	Isolinhas da energia cinética turbulenta para regime uniforme	50

6.1	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU -19%	52
6.2	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU -19%	53
6.3	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para RNU -19%	53
6.4	Perfis verticais de velocidades para RNU -19%	55
6.5	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais na posição X5000 em RNU -19%	56
6.6	Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU -19%	56
6.7	Distribuição transversal das tensões de arrastamento, dados experimentais e numéricos para RNU -19%	59
6.8	Performance do modelo numérico com modelo experimental para X5000 em RNU -19%	59
6.9	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos em RNU -19%	60
6.10	Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos em RNU -19%	61
6.11	Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos em RNU -19%	62
6.12	Tensões de Reynolds XY para RNU -19%	63
6.13	Tensões de Reynolds XZ para RNU -19%	64
6.14	Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU -19%	65
6.15	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU +19%	66
6.16	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +19%	66
6.17	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para o leito de cheia em RNU +19%	67
6.18	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU +42%	67
6.19	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +42%	67
6.20	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para RNU +42%	68
6.21	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU +60%	68

6.22	Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +60%	68
6.23	Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\epsilon$ para RNU +60%	69
6.24	Perfis verticais de velocidades para RNU +19%	70
6.25	Perfis verticais de velocidades para RNU +42%	70
6.26	Perfis verticais de velocidades para RNU +60%	70
6.27	Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU +19%	72
6.28	Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU +42%	73
6.29	Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU +60%	73
6.30	Performance do modelo numérico com modelo experimental para X3000, X5000, X6000 e X7500 em RNU +19%	76
6.31	Performance do modelo numérico com modelo experimental para X5000 para RNU +42%	76
6.32	Performance do modelo numérico com modelo experimental para X5000 para RNU +60%	77
6.33	Evolução das simulações ao longo do canal.	77
6.34	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos em RNU +19%	78
6.35	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos para RNU +42%	79
6.36	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos para RNU +60%	80
6.37	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais na posição X5000 em RNU +19%	81
6.38	Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais RNU +19%, +42% e +60%	82
6.39	Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos em RNU +19%	83
6.40	Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos para RNU +42%	84
6.41	Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos para RNU +60%	85

6.42	Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos em RNU +19%	86
6.43	Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos para RNU +42%	87
6.44	Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos para RNU +60%	88
6.45	Tensões de Reynolds XY para RNU +19%	89
6.46	Tensões de Reynolds XY para RNU +42%	90
6.47	Tensões de Reynolds XY para RNU +60%	91
6.48	Tensões de Reynolds XZ para RNU +19%	92
6.49	Tensões de Reynolds XZ para RNU +42%	93
6.50	Tensões de Reynolds XZ para RNU +60%	94
6.51	Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU +19%	95
6.52	Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU +42%	96
6.53	Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU +60%	97

Simbologia

Símbolo	Descrição
h	Altura e água do leito de cheia
H	Altura de água no leito principal
h_r	Altura relativa
$u_i = u, v, w$	Componentes de velocidade de escoamento segundo x, y e z, respectivamente
ρ	Massa volúmica
p	Pressão
\bar{p}	Pressão média
T	Tensor das tensões desviadoras
f	força de massa
I	Matriz de identidade 3x3
S	Taxa de deformação
u'	Flutuação da velocidade de escoamento
$U_i = U, V, W$	Média temporal das componentes da velocidade de escoamento segundo x,y e z, respectivamente
t	Tempo
Q	Caudal
k	Energia cinética turbulenta
κ	Constante de Von Kármán
L	Escala de comprimento
$C_k, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constantes empíricas das funções
X	Valor da posição X
z	Cota geométrica vertical
δ	Função delta de Kronecker
μ	Primeiro coeficiente da viscosidade
λ	Segundo coeficiente da viscosidade
μ_t	Viscosidade turbulenta
ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
σ	Tensão normal
τ	Tensão tangencial
τ_0	Tensão de arrastamento
∇	Vector das derivadas no espaço

Acrónimos e Abreviações

Acrónimo	Descrição
ASM	<i>Algebraic Stress Model</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional)
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i> (Simulação Numérica Directa)
FCF	<i>Flood Channel Facility, HR Wallingford</i> , Reino Unido
LES	<i>Large Eddy Simulation</i> (Simulação de Grande Escala)
LC	Leito de Cheia
LP	Leito Principal
MaC	<i>Markel and Cell</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
TDMA	<i>Tri-diagonal Matrix Algorithm</i>
VoF	<i>Volume of Fluid</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RU	Regime Uniforme
RNU	Regime não Uniforme
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
Re	Número de Reynolds

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os escoamentos fluviais por si só não traduzem qualquer perigo para os leitos de cheia e populações adjacentes ao rio, o problema surge quando estamos perante precipitações que por serem moderado grau de intensidade, mas com uma acção mais prolongada ou de elevado grau de intensidade e se realizam num curto espaço de tempo, provocam um aumento significativo rio no leito principal (LP) e consequentemente transporte de massa para os leitos de cheia (LC), a este fenómeno denomina-se de cheia/inundação fluvial. Este é um fenómeno natural, cíclico que não pode ser evitado. A segurança das populações ribeirinhas é essencial, pois o impacto de inundações é catastrófico, por norma causam grandes prejuízos e danos materiais, erosão e alteração da morfologia do terreno e por vezes ocorrem perdas de vidas humanas resultantes destas catástrofes. É nesse sentido que se pretende melhorar e aprofundar os conhecimentos sobre este tipo de escoamentos de modo a servir de suporte para a criação de cartas de zonas inundáveis e de cartas de riscos de inundações indicativas das potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundações (Directiva 2007/60/CE, 23 de Outubro de 2007).



Figura 1.1: Rio Acari, um dos maiores cursos de água do Rio de Janeiro (Brasil 2011).

1.2 Objectivo

O presente estudo tem como objectivo modelar e simular um canal de secção composta no programa ANSYS® CFX, posteriormente fazer uma comparação entre os resultados obtidos através de modelos numéricos simulados no programa e resultados obtidos experimentalmente no Departamento de Hidráulica e Ambiente, Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Tais resultados e conclusões servem para uma melhor compreensão dos canais de secção composta e seus escoamentos.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 1: Consiste numa breve introdução do estudo a realizar;
- Capítulo 2: Apresenta uma revisão sobre os trabalhos realizados no âmbito de escoamentos em canais de secção composta e diferentes modelos de turbulência. Esta revisão é fundamental para um correcto entendimento e interpretação de resultados;
- Capítulo 3: Caracteriza a Dinâmica de Fluidos Computacional;
- Capítulo 4: Descrição da simulação/modelação e validação do modelo;
- Capítulo 5: Apresenta os dados de simulações de escoamentos uniformes, com respectiva comparação com dados experimentais;
- Capítulo 6: Apresenta os dados de simulações de escoamentos não uniformes, com respectiva comparação com dados experimentais;
- Capítulo 7: Apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

NOTA: Nesta dissertação foi usada notação anglo-saxónica para a separação decimal.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Base teórica

2.1.1 Introdução

Como foi referido anteriormente este capítulo apresenta uma revisão sobre os estudos realizados no âmbito de escoamentos em canais de secção composta e diferentes modelos de turbulência. Como tal, antes de se apresentar uma base mais teórica é necessário e importante entender alguns conceitos:

- Escoamento com superfície livre ocorre quando um líquido escoa em contacto com a atmosfera.
- Considera-se regime permanente quando as características do escoamento (altura de água, H ; velocidade, v ; caudal, Q) permanecem inalteradas ao longo do tempo, (Chow, 1959).

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

- Canal de secção composta divide-se em leito principal (LP) e leito de cheia (LC), o primeiro caracterizado por uma maior profundidade, menor largura e maior velocidade face ao segundo.
- Número de Reynolds, R_e

$$R_e = \frac{uR}{v} \quad (2.2)$$

Onde R é o raio hidráulico (m), u a velocidade média (m/s) e v a viscosidade cinemática (m²/s)

- Regime turbulento é caracterizado pelo seu movimento aleatório, faz com que uma partícula além da velocidade no sentido do escoamento, está animada de movimento

de agitação, com velocidades transversais ao escoamento, consegue-se distinguir do regime laminar pois o seu número de Reynolds, R_e é muito mais elevado, acima dos 4000. Este tipo de escoamento é o caso mais comum nos escoamentos presentes na natureza (Massey, 2002).

2.1.2 Secção composta

Os canais de secção composta (Figura 2.1) são caracterizados pelas diferenças de velocidade que se verificam entre o escoamento no leito principal e nos leitos de cheias. Outra característica dos leitos de cheia é o facto da altura de escoamento ser mais baixa, podendo ter uma rugosidade diferente, mais elevada, isto é no caso de uma cheia o leito de cheia poderá ser a planície adjacente ao rio, sendo por norma composta por vegetação e outros materiais e formas que alteram a rugosidade. Todas estas diferenças criam uma camada de mistura na região de interface dos leitos e respectivas estruturas turbulentas. Nos canais de secção composta as correntes secundárias têm um papel muito importante (Jing *et al.*, 2009).

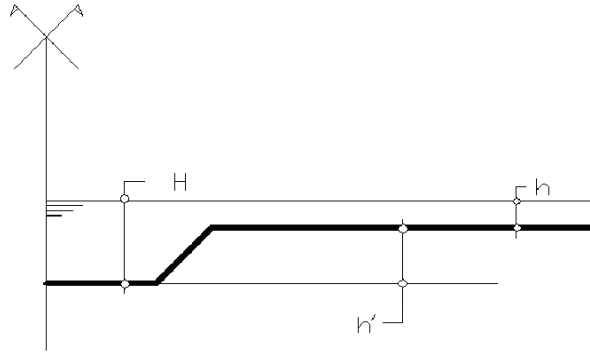


Figura 2.1: Exemplo de um canal de secção composta, Pinto (2010)

A Equação (2.3) define a altura relativa h_r que é um parâmetro adimensional que se obtém através da relação entre a altura de escoamento nos leitos de cheia, $h=(H - h')$ e altura total de escoamento no leito principal H .

$$h_r = \frac{H - h'}{H} \quad (2.3)$$

Na Figura 2.2 pode-se observar a estrutura turbulenta típica de um escoamento em secção composta num canal prismático. Identificam-se dois tipos de vórtices, os de larga escala e eixo vertical, presentes na interface e gerados pelo diferencial de velocidades entre os leitos, provocando uma transferência de quantidade de movimento e consequentemente alterações nas distribuições das velocidades (Nezu & Nakagawa, 1993). Por outro lado, também é possível verificar a existência de vários vórtices, com geometria helicoidal e eixo

horizontal, que se desenvolvem longitudinalmente e que são denominados por correntes secundárias. Estas correntes são resultado da anisotropia da turbulência geradas nas fronteiras, sendo na prática, estruturas difíceis de caracterizar porque são complexas e variam com o tempo (Nezu, 1994).

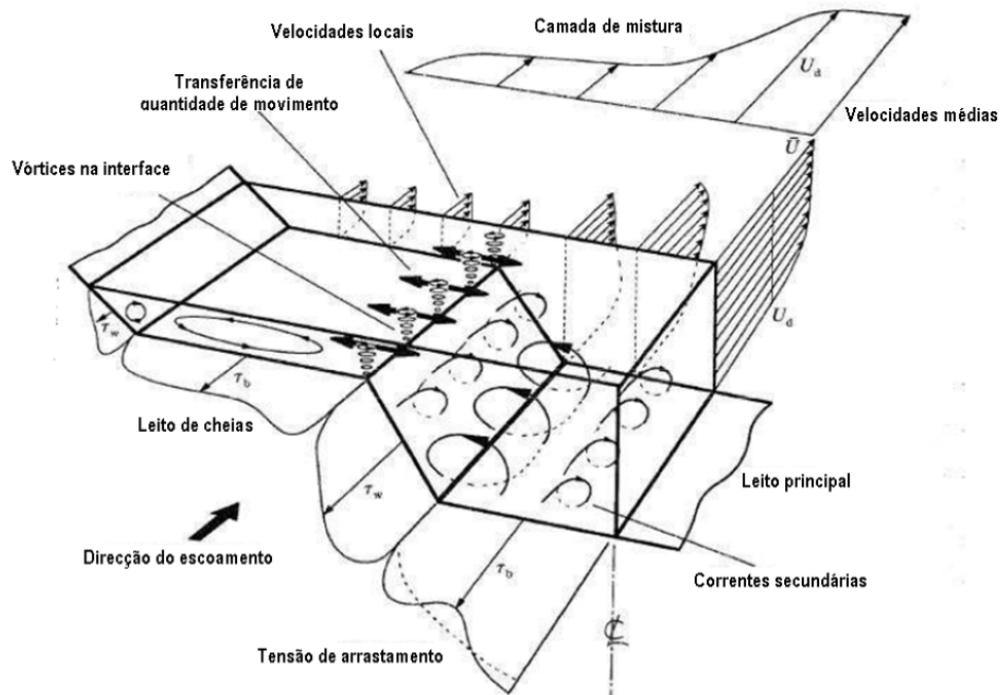


Figura 2.2: Estrutura turbulenta de um escoamento de seção composta, adaptada de Shiono & Knight (1991)

Na Figura 2.3 é possível verificar que existem zonas de aceleração e outras de abrandamento, originando transferência de quantidade de movimento. Segundo Prooijen *et al.* (2005) a transferência da quantidade de movimento é causada principalmente pelos vórtices de eixo vertical, sendo que as correntes secundárias desempenham um papel de pouca importância. Porém, Nezu *et al.* (1999) referem que a importância relativa de cada uma daquelas estruturas turbulentas, vórtices de eixo vertical e correntes secundárias, depende do valor da altura relativa. Assim, para $h_r < 0.333$ os vórtices de eixo vertical são dominantes, aumentando de intensidade as correntes secundárias para valores de h_r superiores.

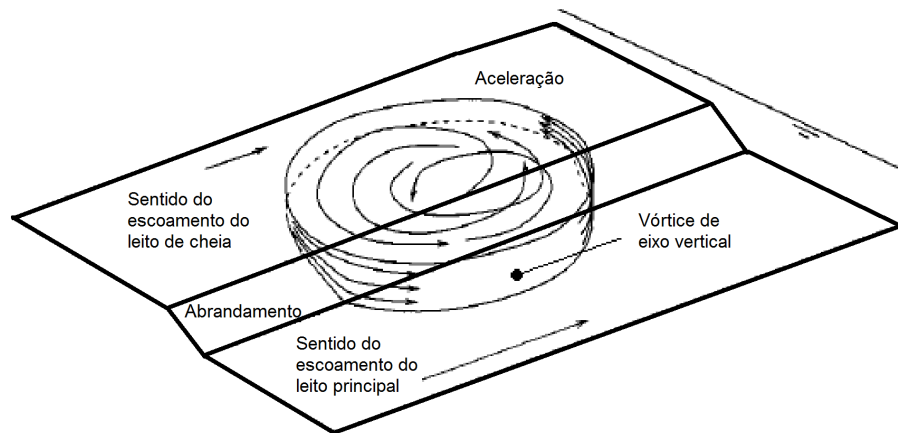


Figura 2.3: Esquema de vórtices de eixo vertical na região de interfaces, adaptado de Prooijen *et al.* (2005)

2.1.3 Camada Limite

No escoamento de líquidos existem duas características fundamentais, a primeira é o facto de não haver descontinuidades nas velocidades, a segunda é que, sobre uma fronteira sólida, no presente caso de estudo, as paredes laterais e fundo do canal a velocidade do fluido é nula, sendo chamada condição *no-slip*, ou seja existência de atrito. Como consequência destes factos a velocidade do fluido aumenta rapidamente desde a superfície(velocidade zero), até à velocidade real do fluido na corrente principal.

O aumento da velocidade em função da distância à superfície(fundo do canal) indica que as tensões de corte estão presentes no escoamento.

Também o gradiente de velocidade é elevado, ou seja, o aumento do valor da velocidade é conseguido através do afastamento da superfície(fundo). Como se pode observar na Figura 2.4, o gráfico de velocidade u em função da distância y ao ponto X na fronteira presente. Assim pode-se dividir o escoamento em duas regiões distintas, a primeira abaixo da fronteira da camada limite onde se verifica um maior gradiente de velocidade, e a segunda na zona acima da camada limite onde não se verificam grandes gradientes de velocidade e os efeitos da viscosidade podem ser desprezáveis (Massey, 2002).

Como a altura de escoamento é relativamente baixa é expectável que a primeira região se desenvolva e ocupe a totalidade da altura do escoamento, ou seja existe desenvolvimento do gradiente de velocidade até à superfície livre.

Como se pode observar na Figura 2.4 existe uma velocidade u paralela ao leito do canal, essa velocidade inicialmente traduz um regime laminar até ao ponto/região de transição, a partir daqui torna-se um regime turbulento com uma subcamada viscosa de fina espessura que se estende ao longo do escoamento.

Na modelação de rios ainda não foi possível criar um método que resolvesse o campo de fluxo da viscosidade adjacente à parede devido aos muitos números de nós da malha

necessários a uma correcta solução. Consegue-se ultrapassar este problema com o uso de "funções da parede", que na realidade são funções aplicadas na região. A teoria da parede é normalmente usada em superfícies pouco rugosas, podendo ser possível efectuar modificações para superfícies mais rugosas (Wright, 2001). As velocidades seguem a lei da parede para toda a profundidade do escoamento, excepto na superfície livre. Como tal, podem ser usados vários métodos para medir a tensão tangencial, e a lei logarítmica pode ser aplicada de maneira satisfatória (Sofialidis & Prinos, 1998).

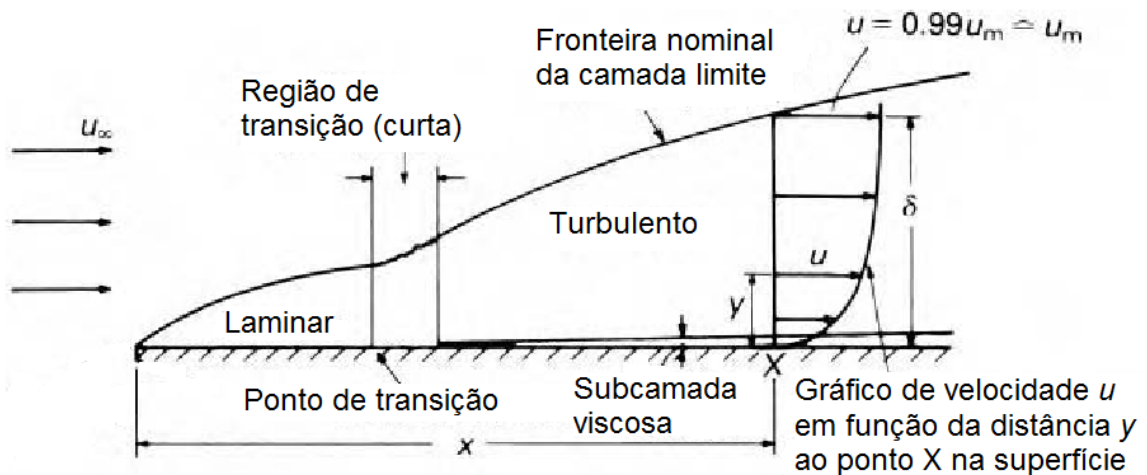


Figura 2.4: Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma superfície sólida, adaptado de Massey (2002)

2.1.4 Camada de Mistura

Nos escoamentos fluviais é comum existir LP e LC como foi explicado anteriormente, existindo uma diferença de velocidades entre os leitos. Essa diferença de velocidades provoca um fenómeno chamado camada de mistura que consiste como o próprio nome indica na mistura das velocidades longitudinais dos leitos provocando uma redução da velocidade no leito com maior velocidade e um aumento da velocidade do leito com menor velocidade, essas alterações acontecem na região de mistura como se pode observar na Figura 2.5.

Existem muitos fenómenos directamente associados à camada de mistura como é caso dos vórtices verticais, transferência de quantidade de movimento entre outros, todos eles resultantes das diferenças de velocidades.

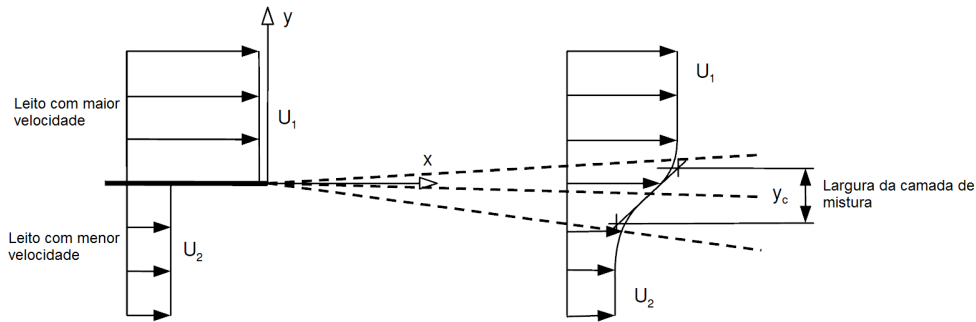


Figura 2.5: Esquema de desenvolvimento da camada de mistura, adaptada de Nijs (2003)

Não sendo um aspecto focado no presente trabalho é importante referir que a largura da camada de mistura não é constante, varia consoante as velocidades dos leitos. Para mais conhecimento do assunto consultar Prooijen *et al.* (2005).

2.1.5 O papel dos modelos de turbulência

O cálculo da turbulência não pode ser feito através de um método exacto, como tal tem de se usar modelos aproximados que com a ajuda de informação empírica permita relacionar a turbulência.

Os modelos hidráulicos de turbulência tiveram o seu início por volta de 1970, este estudo foi iniciado por um pequeno grupo de investigadores. Devido à falta de modelos, os testes foram bastante limitados tal como as suas conclusões que ficaram a aguardar novos testes e modelos. Segundo Rodi (1993) o modelo de turbulência $k-\epsilon$ é considerado o melhor modelo testado para diferentes fluxos de corrente.

Na hidráulica os escoamentos comportam-se quase sempre em regimes turbulentos, significa que o seu movimento além de completamente aleatório se processa num plano tridimensional com a mistura de partículas a dar-se de uma forma não linear, devido a estas complexidades neste tipo de escoamento é particularmente difícil de prever. Os novos modelos 3D com ajuda de modelos matemáticos permitem dar boas estimativas sendo comparados com os modelos experimentais.

Apesar dos avanços tecnológicos nos computadores, o escoamentos turbulentos não podem ser calculados com um método exacto. As equações que descrevem o movimento turbulento são conhecidas como Navier-Stokes e só através de cálculos matemáticos é possível resolver estas equações. Sendo o seu único problema o processamento e armazenamento de dados que impede que se use em qualquer escoamento turbulento. Essa razão prende-se com o facto das estruturas turbulentas de pequena escala presentes no movimento serem bastante pequenas em comparação com grandeza do escoamento, tipicamente 10^3 vezes menores. Para captar todas as escalas será necessário refinar a malha de tal modo que nas zonas de interface a ordem de grandeza seja 10^9 , o que significa que este processo será

tridimensional de modo a abranger o canal no seu todo. Tornando bastante demorado o processo, pois aos inúmeros pontos da malha acresce uma grande quantidade de operações matemáticas. Hoje em dia tal já é possível, apenas para casos muito simples. Saffmann (1977) já previa que aproximadamente em 2013, 20 anos depois do seu estudo, já houvessem computadores com capacidade de resolver as equações exactas do escoamento turbulento.

Para evitar a solução directa das equações de Navier-Stokes (Direct Numerical Simulation, DNS) é comum usar a simplificação das mesmas que consiste numa aplicação de uma média temporal, as equações resultantes chamam-se *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Esta simplificação veio suscitar uma nova problemática, pois as equações passam a termos desconhecidos representando o transporte médio de quantidade de movimento, temperatura e massa. Considera-se um sistema de equações abertas, cujo apenas é possível com a ajuda de constantes empíricas, onde as equações do método de cálculo baseado na média do fluxo são semi-empíricas. No presente caso, o modelo $k-\varepsilon$ tem cinco constantes empíricas que apresentam os seguintes valores de referência (Launder & Spalding, 1974):

- $C_\mu = 0.09$
- $C_{\varepsilon 1} = 1.44$
- $C_{\varepsilon 2} = 1.92$
- $\sigma_k = 1.0$
- $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Os modelos de turbulência apenas podem dar descrições aproximadas, com uma determinada série de constantes empíricas sendo o modelo apenas válido para um determinado escoamento ou, no máximo para um pequeno leque de escoamentos. Aumentando o número de constantes empíricas podemos abranger um maior leque de escoamentos, o que não significa que seja o modelo mais adequado. Pois consome bastante recursos informáticos, não sendo linear que se traduza em melhores resultados apenas garante um modelo compatível com mais escoamentos (Rodi, 1993).

2.2 Sistema de equações do modelo $k-\varepsilon$

2.2.1 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento dos fluidos. Essas equações representam a conservação da quantidade de movimento do fluido com pressuposto que, a tensão no fluido é o somatório das contribuições da pressão com as da viscosidade.

Outro ponto importante nas equações de Navier-Stokes é o facto das mesmas não descreverem a posição mas sim a velocidade, sendo assim pode-se afirmar que a resolução dessas equações pode ser chamado de campo de velocidades ou campo de escoamento.

Tal campo descreve a velocidade do fluido no espaço e no tempo. Depois de resolvidas as equações e encontrado o campo de velocidade pode-se encontrar caudais, tensões de arrastamento entre outras.

O início da resolução das equações Navier-Stokes começa com a aplicação da conservação da quantidade de movimento para um certo volume de controlo arbitrário. Sendo o presente estudo referente a escoamentos fluviais, e estes compostos por água, é de referir que se usam equações para fluidos incompressíveis.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla T + f \quad (2.4)$$

Na equação (2.4) o primeiro membro representa a variação total da quantidade de movimento no tempo, e o segundo membro descreve o somatório das forças externas. O termo u representa a velocidade do escoamento, ρ a massa volúmica do fluido, p a pressão, T é o tensor das tensões desviatórias, f as forças de massa (por unidade de volume) e ∇ é o vector das derivadas espaciais, descrito em pormenor na equação (2.5).

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

As equações Navier-Stokes são equações diferenciais não lineares, que não estabelecem relações entre as variáveis em estudo. A não linearidade deve-se ao termo da aceleração convectiva, representada na Equação (2.6), que é a aceleração associada à variação de velocidade em relação à sua posição inicial.

$$u \nabla u \quad (2.6)$$

O gradiente de pressão, ∇p representa as tensões normais resultantes, não sendo exclusivas de situações dinâmicas. Já o gradiente ∇T representa as forças viscosas que para escoamentos incompressíveis representa exclusivamente o efeito de atrito.

Podemos definir o tensor das tensões totais através da seguinte equação:

$$\sigma = -\rho I + T \quad (2.7)$$

Onde que I representa a matriz identidade 3x3, p a pressão que é:

$$p = -\frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (2.8)$$

E T é o tensor das tensões desviatórias. A função delta de Kronecker, δ_{ij} , assume vários valores, se $i=j$ então $\delta_{ij}=1$, caso contrário $\delta_{ij}=0$ para $i \neq j$.

A viscosidade é representada por μ , o primeiro coeficiente de viscosidade, representa a viscosidade dinâmica ou apenas viscosidade e λ o segundo coeficiente de viscosidade. O

termo λ representa o efeito viscoso derivado da variação de volume, variação essa muito difícil de determinar sendo por muitas vezes desprezado. Quando tal não acontece é normal a seguinte aproximação, $\lambda \approx -2/3\mu$.

$$T_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \nabla u \quad (2.9)$$

A partir das equações (2.7), (2.8) e (2.9) é possível escrever a equação de tensor de tensões para um fluido Newtoniano:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \nabla u \quad (2.10)$$

No caso de um fluido incompressível, como é o presente estudo, devido à continuidade $\nabla u = 0$, então podemos simplificar a equação (2.10) para:

$$\sigma = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = -pI + 2\mu S \quad (2.11)$$

Onde S é o tensor da taxa de deformação que é igual a:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

Assumindo então um fluido incompressível e Newtoniano, podemos dizer que o efeito da viscosidade é representado pelo vector Laplaciano do campo de velocidade. Isto é, a derivada do gradiente de tensões desviadoras, ∇T , transforma-se em $\mu \nabla^2 u$.

Partindo do pressuposto anteriormente apresentado, e conjugando com a equação (2.4) é possível obter:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f \quad (2.13)$$

Onde, $\partial u / \partial t$ é a aceleração local, $u \nabla u$ é a aceleração convectiva, ∇p é o gradiente de pressão, $\mu \nabla^2 u$ é o termo da viscosidade e f as forças de massa.

Para fluidos incompressíveis, apenas os termos convectivos são não-lineares.

As equações (2.14), (2.15) e (2.16) representam as equações Navier-Stokes num sistema de coordenadas cartesianas tridimensional. Sendo criadas através da equação (2.13) com a substituição do termo gradiente, ∇ , pela respectiva equação (2.5).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (2.14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (2.15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (2.16)$$

A equação (2.17) representa a equação da continuidade ou conservação da massa. Sendo esta a única necessária adicionar aos sistema de equações, no caso de se negligenciar os efeitos da temperatura.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho u) = 0 \quad (2.17)$$

No caso de um fluido incompressível, $\nabla u = 0$ a equação pode ser simplificada:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

2.2.2 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

No estudo de escoamentos turbulentos é bastante usada uma simplificação das equações de Navier-Stokes, chama-se a essa simplificação, equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*, RANS). Esta simplificação envolve em retirar médias temporais de velocidade nas equações (Pope, 2000).

Para um fluido incompressível e Newtoniano essas equações podem ser escritas através da seguinte forma:

$$\rho \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} \right) = \rho \overline{f_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2.19)$$

Na equação (2.19) qualquer termo que tenha o operador (e.g. $\overline{f_i}$) significa que está abrangido pela média temporal ou média de Reynolds. A parte esquerda da equação diz respeito à mudança média na quantidade de movimento devido a instabilidade média no escoamento e à convecção média do escoamento. Esta alteração é compensada pelo tempo médio das forças da massa ($\rho \overline{f_i}$), pela tensão isotrópica $\overline{p} \delta_{ij}$, onde \overline{p} é a pressão média no tempo, $\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$ as tensões devido à viscosidade e $\rho \overline{u'_i u'_j}$ são as tensões devido a flutuações no campo de velocidade, que são chamadas de tensões de Reynolds.

A simplificação das equações de Navier-Stokes para RANS baseia-se na decomposição de Reynolds. Tal é possível através da separação da velocidade instantânea u em duas componentes, na componente média U e na componente da flutuação u' . Assim podemos escrever a velocidade instantânea da seguinte forma:

$$u_i(x, t) = U_i(x, t) + u'_i(x, t) \quad (2.20)$$

Assim a velocidade instantânea pode ser vista como a soma da velocidade média temporal com a componente de flutuação (ver Figura 2.6).

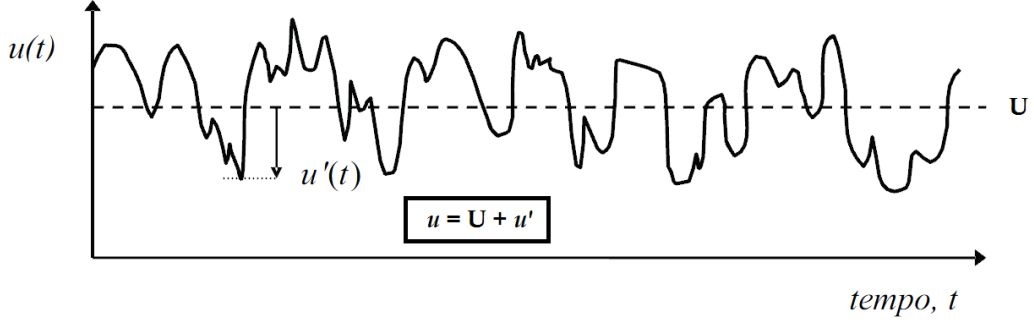


Figura 2.6: Série temporal de velocidades instantâneas $u(t)$ para um intervalo de tempo t e a sua decomposição em média temporal e flutuações instantâneas, adaptada de Campbell (2005)

2.2.3 Modelos de fecho de turbulência

Hoje em dia os escoamentos turbulentos podem ser resolvidos através de várias técnicas. Uma delas é resolver as equações RANS com diversos modelos de turbulência, os principais modelos de turbulência são:

- Modelos algébricos simples ou de zero equações;
- Modelos de uma equação;
- Modelos de duas equações (e.g. $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ e $k-\varepsilon$ não linear);
- Modelos de tensões de Reynolds ou de fecho de 2^a ordem;
- Modelos algébricos de tensões.

O método mais simples de resolução dos modelos de fecho de turbulência é o modelo algébrico simples. Não é necessário qualquer equação adicional e as tensões de Reynolds são calculadas directamente a partir das variáveis do escoamento. Os modelos algébricos simples recorrem à simplificação de Boussinesq (1877), que relaciona as tensões de Reynolds com a taxa média de deformação através da viscosidade turbulenta, como se pode observar:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.21)$$

Onde $\mu_t = \rho \nu_t$ corresponde à viscosidade turbulenta e $k = \frac{1}{2} \overline{u_j'^2}$ é a energia cinética turbulenta do escoamento.

Os modelos algébricos simples são demasiado simplistas para um uso geral, assumem que a turbulência é dissipada quando na realidade é gerada, ignorando assim o transporte da turbulência.

Já os modelos de uma equação conseguem quantificar o transporte da turbulência resolvendo a equação de transporte turbulento. Genericamente a energia cinética turbulenta, k . Sendo que o modelo original de uma equação foi proposto por Prandtl (1945).

Nos anos 40, Kolmogorov (1942) e Prandtl (1945) surgiram com hipótese que v_t fosse proporcional à raiz quadrada da energia cinética turbulenta, \sqrt{k} . Sendo assim é possível escrever a viscosidade turbulenta como:

$$v_t = C_k L \sqrt{k} \quad (2.22)$$

Onde C_k é uma constante empírica e L é o comprimento de mistura para o movimento em larga escala.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_j'^2} \quad (2.23)$$

O modelos de duas equações conseguem determinar a energia cinética turbulenta e também a escala de comprimento através das equações de transporte. A grande diferença para os modelos de uma equação está na escala de comprimento que permite caracterizar os vórtices que contêm energia.

Os modelos de duas equações usam uma equação de transporte para a escala de comprimento que permite a sua distribuição de modo a que possa ser determinada mesmo em situações de escoamentos complexos.

O primeiro modelo de duas equações, k - ε foi proposto por Harlow & Nakayama (1967), sendo um dos modelos mais usados hoje em dia.

A hipótese de Boussinesq ainda é usada para definir a tensões de Reynolds. E a viscosidade turbulenta é relacionada com a energia cinética turbulenta da mesma maneira que no modelo de uma equação.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.24)$$

Onde a constante empírica C_μ é conseguida através do produto de C_k com C_D .

A equação semi-empírica k usada no modelo k - ε é igual ao modelo de uma equação (Rodi, 1993):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_\mu \frac{k^2}{v_t} \quad (2.25)$$

A equação semi-empírica ε usada no modelo k - ε para um canal de superfície aberto (Nezu & Nakagawa, 1993):

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon v_t}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.26)$$

O modelo de duas equações $k-\varepsilon$, usa os valores de referência (Launder & Spalding, 1974) já apresentados anteriormente.

2.3 Simulações 3D de escoamentos em canais de secção composta

Naden *et al.* (2006) usaram o Flood Channel Facility (FCF), um canal de 60 metros de comprimento em Wallingford no Reino Unido para fazer uma comparação de dados experimentais e numéricos. Foram usados vários programas de CFD entre os quais o Fluent, Phoenix, SSIIM e Telemac-3D. Sendo que todos eles operam soluções RANS, modelo $k-\varepsilon$ mas com respectivas alterações em função do programa. Todas as malhas usadas, variavam de programa para programa de modo a serem o mais fidedignas a nível de resultados a comparar. Foi possível concluir que todos os programas usados são bons para comparação, desde que sejam anteriormente calibrados. Especialmente ao nível das velocidades no LP, subvalorizando as correntes secundárias. Mas já Morvan *et al.* (2002) tinham dito que o modelo isotrópico $k-\varepsilon$ não era capaz de reproduzir as correntes secundárias.

Sofialidis & Prinos (1998) estudaram o escoamento de canais de secção composta através de um modelo não linear $k-\varepsilon$, concluindo que, é a partir de 0.2547 m de profundidade que começa a haver interacção significativa entre LP e LC.

O uso de modelos com uma *top-wall* foram muito usados no passado, mas como foi comprovado por Rameshwaran & Naden (2004), foram mal usados e interpretados pois a possibilidade de se ter uma superfície livre vai fazer com que os resultados sejam muito mais exactos e correctos, mais propriamente para as tensões de arrastamento. A modelação da superfície livre é fundamental para uma boa previsão de tensões tangenciais.

Uma das desvantagens dos modelos de duas equações prende-se com o facto de dependerem da validação da aproximação de Boussinesq, sendo possível evitar esta aproximação, determinando as tensões de Reynolds, indirectamente ou directamente, através das suas próprias equações diferenciais de transporte. Há dois métodos para resolver esta questão modelos de tensões algébricas *Algebraic Stress Model* (ASM) e o modelo de tensões de Reynolds, *Reynolds Stress Model* (RSM). O RSM baseia as tensões de Reynolds nas próprias equações diferenciais de transporte, tem a vantagem de alguns termos da equações serem exactos, sendo esses termos os que mais tendem a influenciar o modelo, contudo, este modelo é muito exigente a nível computacional e só pode ser aplicado em problemas relativamente simples, conduta e secções rectangulares, e posteriormente canais de secção composta. O modelo ASM tem algumas vantagens, é mais rápido pois simplifica as equações de transportes das tensões de Reynolds substituindo-as por equações algébricas (Younis, 1992).

A turbulência tem um papel importante na afectação do transporte de momento, e por sinal, nas propriedades do escoamento. O grande problema não é a importância da turbulência mas sim a maneira em que os modelos baseados na aproximação de Boussi-

nesq tem descrito os efeitos da turbulência sobre as propriedades vazão média. São essas as razões que levam a um estudo intensivo na tensões algébricas e tensões de Reynolds em modelos de turbulência, principalmente em áreas críticas de escoamento, tais como a transição LP-LC.

Outro princípio do modelo $k-\varepsilon$ é a necessidade da viscosidade turbulenta, μ_t , ter de ser isotrópica. Isto é, a relação entre as tensões de Reynolds e a taxa média de deformação tem de ser igual, em todas as direcções. Esta suposição, a viscosidade turbulenta, μ_t ser isotrópica, pode levar a resultados incorrectos. Como consequência foram desenvolvidos modelos mais complexos, anisotrópicos para as equações das tensões de Reynolds com objectivo de anular possíveis correcções, para são necessárias seis equações extra no modelo. Com este minimizar de erro surgem os contras, modelos mais exigentes computacionalmente que os actuais e ainda não foram totalmente validados.

Segundo Yakhot *et al.* (1992) o modelo $k-\varepsilon$ usando *Renormalization Group Theory* (RNG) resulta em grande dissipação de turbulência em áreas de grande tensão, reduzindo a viscosidade turbulenta e melhorando as previsões do modelo nas situações onde possivelmente as zonas de separação se podem vir a formar. É reconhecido que as bases fundamentais do modelo $k-\varepsilon$ possam ser questionadas, principalmente nos locais onde a turbulência é altamente anisotrópica, assim o modelo RNG consegue ajudar nos problemas básicos do $k-\varepsilon$.

Nos modelos $k-\varepsilon$ é sempre necessário especificar as funções de parede, seguindo os procedimentos adoptados por Launder & Spalding (1974) de modo a que a lei da parede possa ser correctamente aplicada.

O modelo $k-\varepsilon$ normal define a turbulência como isotrópica, não conseguindo reproduzir as correntes secundárias. Embora o modelo $k-\varepsilon$ não linear consiga simular correctamente correntes secundárias, não consegue captar algumas das estruturas turbulentas.

Segundo Nezu *et al.* (1999) a profundidade dos LC influencia directamente os vórtices horizontais como se pode observar na Figura 2.7

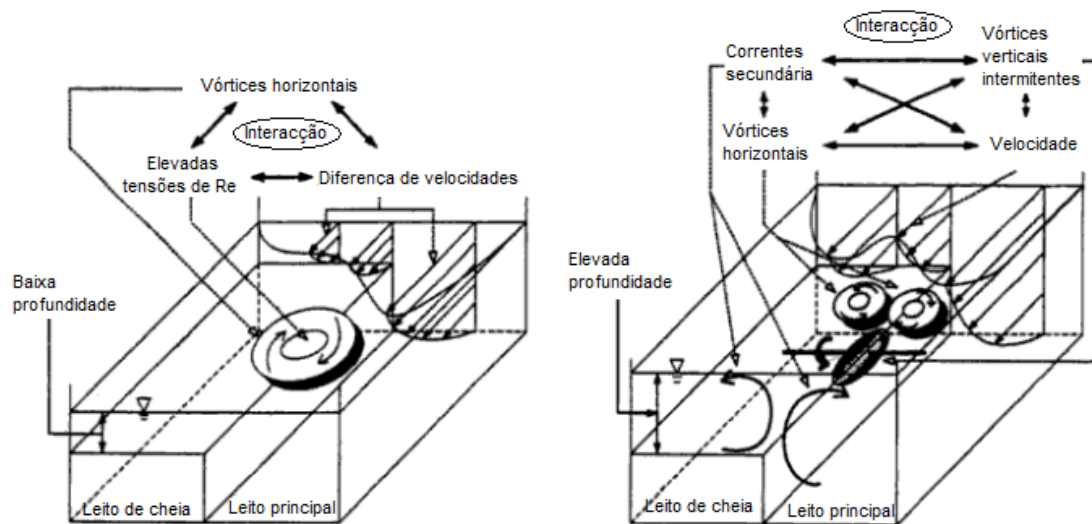


Figura 2.7: Campos de escoamentos para canais de leito de cheia com baixa e elevada profundidade, adaptada de Nezu *et al.* (1999)

Modelos numéricos 3D podem acrescentar informação bastante útil. Mas ao mesmo tempo consomem mais recursos informáticos e aumenta a necessidade de compreensão dos fenómenos dentro do próprio modelo, sendo também necessário a validação desses mesmos modelos através da comparação com casos práticos (Lane *et al.*, 1991).

Capítulo 3

Aplicações Computacionais de Dinâmica dos Fluidos (CFD)

3.1 Introdução

Antes de se aprofundar este capítulo convém esclarecer o que é a Dinâmica de Fluidos Computacional ou CFD, esta não é mais que a análise de sistemas envolvendo diversas áreas, desde escoamento de fluidos, transferência de calor e até mesmo reacções químicas, tal só é possível usando simulações computacionais. O seu uso industrial é bastante variado, sendo usado em projectos de aerodinâmica de aviões e carros, centrais eléctricas, e como não podia deixar de ser frisado pois é o âmbito deste trabalho, na hidrologia e oceanografia, em particular no escoamentos de rios.

Resta agora compreender como funciona o CFD, os seus códigos são estruturados através de algoritmos numéricos com a função de resolver problemas de escoamento de fluidos. Os programas comerciais de CFD trazem incluído diversos pacotes, bastante sofisticados em que o utilizador pode introduzir os diversos parâmetros do problema em questão e posterior análise de resultados. Como se pode observar na Figura 3.1 um caso particular para o CFX.

Todos os códigos de algoritmos são compostos por três principais elementos, esses são:

- Pré-processador;
- Algoritmos/*Solver*;
- Pós-processador.

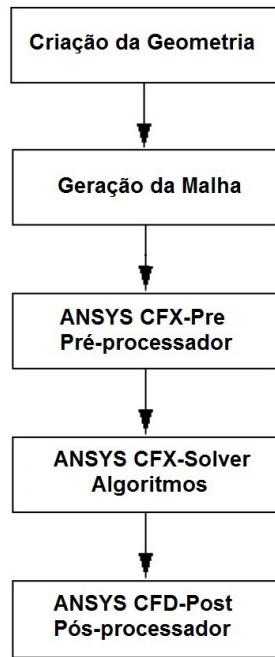


Figura 3.1: Modelo de projecto

3.2 Base de código

3.2.1 Pré-processador

O Pré-processador consiste no início do problema para o CFD, pois é nesta altura que o utilizador define os dados e variáveis do problema, estes dividem-se nas seguintes secções:

- Definição da geometria, consiste na modelação do canal a ser estudado;
- Criação de uma malha, esta pode ser dividida em diferentes secções consoante o grau de interesse da respectiva secção, uma malha mais refinada consegue resultados mais próximos da realidade mas aumenta bastante o tempo de calculo, por norma as malhas ideais não são uniformes, assim conseguem ter melhores resultados com menor tempo de processamento;
- Definição de fenómenos físicos a considerar na modelação;
- Caracterização e definição das propriedades dos fluidos presentes no modelo a ser estudado;
- Definição das condições fronteira e condições iniciais de arranque do modelo.

3.2.2 Algoritmos/*Solver*

A resolução numérica divide-se em três métodos/técnicas distintas: método das diferenças finitas; métodos dos elementos finitos e métodos de volumes finitos. Neste estudo vai-se apenas abordar o método de volumes finitos, pois este é usado nos principais códigos de CFD em particular no CFX/ANSYS, o programa a ser usado neste trabalho.

Em matemática, discretização diz respeito ao processo de transferência de modelos contínuos e equações em contrapartidas discretas. Este processo é normalmente realizado como um primeiro passo para torná-los adequados para avaliação numérica e implementação em computadores.

De forma simplificada podemos dividir o algoritmo numérico na seguintes fases:

- Integração das equações que regem o escoamento ao longo de todos os volumes (finito) do fluido no domínio;
- Discretização - conversão das equações integrais num sistema de equações algébricas;
- Resolução das equações algébricas através de um método iterativo.

Os códigos usados no CFD contêm técnicas de discretização, em termos matemáticos implica um processo de transferência de modelos matemáticos e equações para os tornar adequados na implementação em computadores e permitir uma correcta avaliação numérica dos algoritmos. Essas técnicas são fundamentais para o tratamento e processamento dos fenómenos de transporte, convecção e difusão, respectivas taxa de variação em função do tempo. Considerando que os fenómenos físicos referidos anteriormente são de um elevado grau complexidade e não-linearidade é necessário recorrer a técnicas iterativas. As mais usadas são o *Tri-diagonal Matrix Algorithm* (TDMA) que resolve *line-by-line* as equações algébricas e o *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE) que é um algoritmo que estabelece as relações entre a pressão e a velocidade, este formula e resolve as equações obtendo novas pressões e velocidades, posteriormente as antigas serão corrigidas e novamente recalculadas. (Uma aproximação do campo de velocidade é obtida resolvendo a equação de momento. O termo gradiente de pressão é calculada usando a distribuição da pressão da iteração anterior, ou uma estimativa inicial. A equação da pressão é formulado e resolvida, a fim de obter a distribuição de pressão nova. Velocidades são corrigidas e um novo conjunto de fluxos conservador é calculado.)

3.2.3 Pós-processador

O Pós-processador é a última fase do CFD mas não é por isso que tem um papel menos importante, antes pelo contrário, é fundamental no CFD pois cabe-lhe tratar e apresentar as grandes quantidades de dados processados anteriormente. Com o avanço tecnológico e maior utilização do CFD, este teve de se superar e introduzir novos conceitos e funções,

o Pós-processador tem vindo a ser melhorar a visualização de dados e hoje em dia está equipado com as seguintes ferramentas:

- Exibição e impressão da geometria e malha em 2D ou 3D;
- Representação gráfica de vectores;
- Representação de gráficos (line and particle shaded contour plots);
- Monitorização de partículas ao longo do tempo e espaço;
- Alteração de escalas, possibilidade de mover ângulos de visão, etc.

3.3 Malhas

A definição da malha extremamente importante para a obtenção de resultados fiáveis. Como tal é necessário adequar a malha ao tipo de escoamento e zonas de interesse do caso em estudo. Por norma quanto maior o número de células melhor será a solução obtida, sendo que o ideal será refinar a malha nas zonas de interesse e torna-la mais grosseira em locais de menor interesse. Assim é possível obter melhores fiáveis não sendo necessário recorrer a um esforço computacional demasiado elevado (Franke *et al.*, 2007).

Um conceito básico dos códigos CFD consiste em dividir a geometria fluido em elementos ou células, e depois resolver uma equação para cada célula. Existem duas abordagens para capturar os detalhes geométricos do domínio computacional, essas são:

- A execução de uma malha cartesiana.
- Criação de uma malha *body-fitted* que se caracteriza pela capacidade de se moldar ao objecto. Outra característica prende-se com o facto das células manterem um formato regular ao longo de toda a malha. Em malhas estruturadas as grelhas, linhas acompanham toda a superfície.

Devido a todos os factores posteriormente enumerados, a malha do tipo *body-fitted* é a mais usada no CFD. Como tal vai ser um pouco mais aprofundada. Para uma correcta modelação da malha *body-fitted* é necessário definir e criar um domínio no interior da geometria de modo a adaptar-se correctamente à mesma e respectivos limites. A malha *body-fitted* divide-se em:

- Malhas estruturadas: os cantos das células formam uma malha contínua, as células têm forma de um hexaédrico.
- Malhas não estruturadas: permitem a construção célula a célula sem considerar a continuidade das linhas da malha. A sua forma mais típica é de tetraédrico.

Malha *Block structured*: a malha é construída através de blocos estruturados ligados entre si.

Malha *Chimera*: a malha é estruturada livremente, de modo a encaixar no domínio.

Malha *Hybrid*: combina diferentes elementos (tetraedros, hexaedros, primas)

A malha deve ser refinada o suficiente para conseguir obter resultados adequados ao escoamento e geometria do canal. Sendo o mais adequado o uso de malhas não estruturadas devido às suas capacidades. A precisão da malha aumenta com o número de células e com a diminuição do tamanho das mesmas. Sendo no entanto limitada à capacidade do computador a usar.

As malhas são classificadas consoante as suas características:

- Forma: as células têm por norma a forma de triângulos ou quadriláteros em 2D, o que corresponde a tetraedros e hexaedros em 3D.
- Ortogonalidade: é determinada pelo ângulo entre o cruzamento das linhas da rede. Para um ângulo de 90° diz-se que a malha é ortogonal. Se for diferente de 90° então a malha não é ortogonal.
- Estrutura: uma malha pode ser estruturada, por norma usada no método de volumes finitos, ou não estruturada, usada para método de elementos finitos. Em geral uma malha composta por células triangulares é não estruturada. Células de hexaedros conferem melhor precisão e velocidade de cálculo.
- Blocos: uma malha multi-blocos é constituída por várias malhas estruturadas.
- Posição variável: malhas escalonadas quando as variáveis são calculadas em diferentes posições e malhas não escalonadas onde todas as variáveis são calculadas no mesmo local, por norma o centro da malha.
- Movimentos da malha: malhas fixas ou malhas móveis.

As características mais importantes da malha são:

- A não ortogonalidade da intersecção das linhas da malha. É aconselhável a exclusão de ângulos inferiores a 45° e superiores a 135° .
- A proporção e a taxa de expansão, considerando que o comprimento das células A e B é Δx_A e Δx_B e se a altura das células for Δy_A e Δy_B , então a taxa de expansão da malha destas células é $\Delta x_A/\Delta x_B$ e a proporção é $\Delta x_A/\Delta y_A$.

A proporção da malha e taxa de expansão não deve ser muito elevada de modo a evitar problemas na convergência e imprecisões. Segundo Olsen (1999) as proporções de 2 para

3 não surgem como problema desde que a direcção do escoamento seja paralelo ao lado mais longo da célula. Proporções de 10-50 resultam em lentas convergências. Taxas de expansão abaixo de 1.2 não causam qualquer inconveniente na solução do escoamento, valores superiores a 10 podem dar maus resultados no cálculo de escoamentos.

Considera-se então, que a criação de uma boa malha é fundamental para o cálculo de estruturas com geometrias complexas. O programador terá de analisar a geometria do canal e locais que necessitem de mais refinamento. Na Figura 3.2 pode-se observar a malha adoptada.

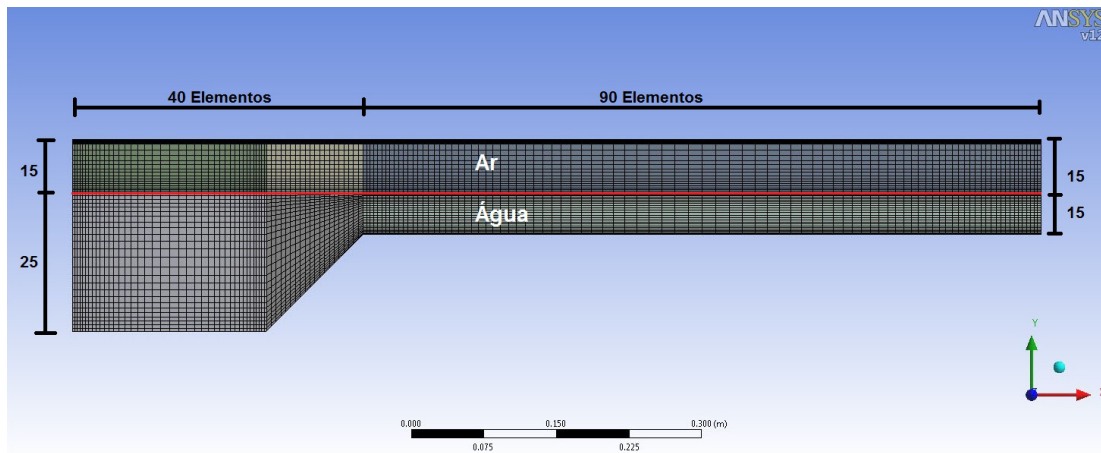


Figura 3.2: Malha adoptada

3.4 Condições de fronteira

É necessário então definir as condições fronteira a que o escoamento se encontra. Para uma superfície sólida é necessário definir a sua rugosidade, é importante de referir que a subcamada viscosa não será resolvida, em vez disso será usada a Lei da Parede (Sofialidis & Prinos, 1998).

Quando o canal e os escoamentos são simétricos é possível reduzir o esforço computacional aplicando um plano de simetria previsto nos programas de CFD. É obrigatório que as duas condições sejam cumpridas pois pode acontecer o caso do canal ser simétrico mas o seu escoamento não.

Os movimentos ou escoamentos de superfície livre são a forma mais comum na natureza, como tal vai estar presente na maioria dos problemas a resolver, isso, levou a uma grande variedade de soluções específicas no CFD. Dentro do CFD podemos adoptar duas categorias bem distintas, as malhas fixas e as malhas não fixas. Dentro do campo de escoamentos em superfície livre temos várias técnicas, o método *Volume of Fluid* (VoF) e o método *Marker and Cell* (MaC) entre muitos outros. O método VOF consiste em resolver equações para a fracção de espaços vazios, (entre fracções vazias 0 e 1), torna-se um problema pois as células de espaços vazios estão constantemente a serem alterados no espaço e no tempo,

como tal é necessário refinar bem a malha na zona de interface ar-água. Este método calcula as velocidades para a água, o ar considera células vazias e não faz qualquer cálculo (Hirt & Nichols, 1981). O método MAC é diferente pois as células contêm sempre fluido, faz cálculos sobre todas as células (Apsley & Hu, 2003).

As superfícies sólidas podem ser classificadas por:

- Rígidas (e.g. compostas por material sólido e impermeável, betão ou vidro)
- Móveis (e.g. compostas por material sem fronteiras definidos como é o caso de areias e cascalho)
- Flexíveis (e.g. compostas por material deformável, vegetação)

Num determinada superfície, as perdas de energia levam a que a resistência de fluxo surja a partir da turbulência perto da fronteira e das macro estruturas de fluxo dentro do canal.

A resistência de fluxo é considerada como sendo composta por três elementos distintos, mas relacionados entre si:

- Arrastamento superficial (e.g. rugosidade devido a textura superficial, rugosidade granular)
- Arrastamento de forma (e.g. rugosidade devido à forma geral do canal, curvas)

O arrastamento superficial e de forma, ocorrem essencialmente no plano das superfícies, já o arrastamento de forma advém da geometria do canal (Morvan *et al.*, 2008).

Capítulo 4

Descrição da simulação/modelação e validação do modelo

4.1 Introdução

O canal de secção composta a modelar é igual ao cana experimental existente no Departamento de Hidráulica e Ambiente no Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Tendo já sido utilizado por Pinto (2010) e Teixeira (2011) na simulação de escoamentos de regime uniforme e não uniforme. O presente estudo tem como objectivo a comparação de resultados experimentais (LNEC) e resultados numéricos (ANSYS® CFX).

Tendo já sido modelado e simulado e comparado os escoamentos de regime uniforme e não uniforme para $h_r=0.2$ por Tiago (2011) através do programa ANSYS® CFX e usando o modelo de fecho de duas equações $k-\varepsilon$ com algum sucesso, utilizar-se-á o mesmo programa e modelo para uma $h_r=0.3$ e posterior comparação de resultados de Teixeira (2011).

No presente capítulo vai ser descrita a simulação do escoamento, métodos de modelação, malhas usadas, simplificações feitas entre outras.

Sendo pertinente a validação do modelo o mesmo será discutido no presente capítulo, irá servir para a sua validação e posterior utilização. Foram detectados alguns erros e inconformidades no modelo sugerido e apresentado por Tiago (2011), depois de um análise aprofundada conclui-se que tais incoerências a nível de resultados no escoamento de regime uniforme para uma $h_r=0.3$ foram resultantes de um erro na modelação da geometria do canal.

O canal experimental a modelar e simular (Figura 4.1), tem 2 metros de largura e 10 metros de comprimento. A sua secção transversal é composta por um leito principal de geometria trapezoidal presente no meio do canal, com 0.4 metros de largura (base inferior) e 0.10 metros de altura e 0.6 de largura (base superior). Já os leitos de cheia são de geometria rectangular, com 0.7 metros de largura e altura variável consoante o escoamento

a simular. O canal é composto por um declive longitudinal médio de 1.10×10^{-3} m/m.

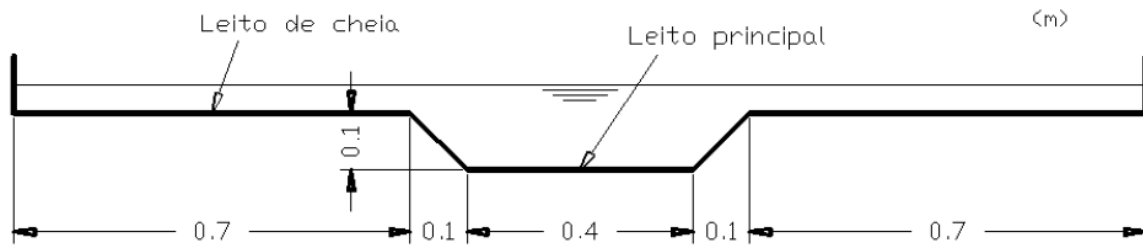


Figura 4.1: Secção transversal do canal adaptada de Tiago (2011)

4.2 Descrição da simulação/modelação

Para a modelação e simulação do canal de secção composta será usado o programa ANSYS® CFX, este é subdividido em 3 secções de modelação: Geometria (*Geometry*), Malha (*Mesh*) e Processador (CFX), como pode ser observada na Figura 4.2.

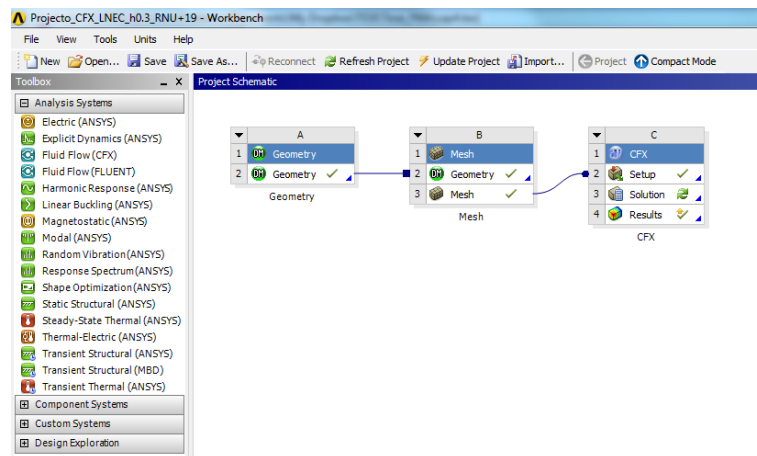


Figura 4.2: Ambiente de trabalho do programa ANSYS®

4.2.1 Geometria

Na modelação da geometria do canal foi considerada uma altura de ar de 0.05 metros, para permitir um escoamento bifásico composto por água e ar de modo a permitir oscilações na superfície livre, condição essencial para o estudo. A superfície livre é modelada no Ansys® CFX pelo método VOF parcialde Hirt & Nichols (1981).

De modo a reduzir o esforço computacional foi adoptada uma simetria exactamente a

meio do leito principal, como se pode observar na Figura 4.3. Outra redução de esforço computacional é conseguida através de um corte longitudinal no canal, este tem 10 metros de comprimento e foi dividido em dois trechos com 5 metros de comprimento cada. Terá que se exportar o dados da fronteira de jusante (*outlet*) da primeira simulação e introduzi-los na fronteira a montante (*inlet*) no segundo trecho da modelação. Assim será necessário executar 2 simulações para o modelo ficar completo.

Foi também necessário subdividir a secção transversal em leito principal (LP) e leito de cheia (LC), de modo a permitir a imposição a montante de velocidades distintas.

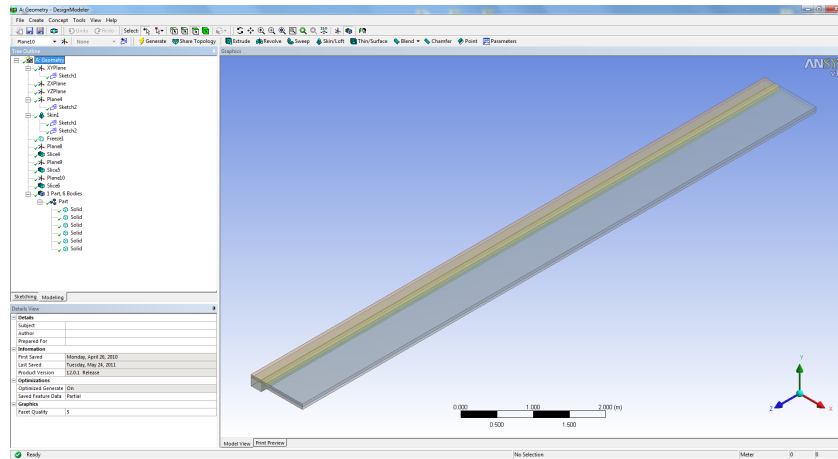


Figura 4.3: Modelação do canal no Geometry do ANSYS®

4.2.2 Malha

A malha adoptada para as simulações será uma malha hexaédrica que segundo Biswas & Strawn (1998) e Tiago (2011) é a mais adequada para este tipo de escoamentos. A malha será mais refinada nas zona de interfaces (ar-água), nas fronteiras (fundo e paredes laterais), no eixo de simetria e na zona de separação entre o leito principal e leito de cheia (interface). A divisão da malha divide-se em dois grupos, *bias* e *no-bias*. A malha *no-bias* é composta por uma divisão em partes iguais, já na malha *bias* é adoptada uma divisão variável, sendo a última usada nas regiões de fronteira de modo a refinar a dimensão das células, diminuir os intervalos entre células e conseguir uma melhor exactidão.

A malha hexaédrica é composta por 600000 elementos, sendo dividida na vertical por 40 elementos no leito principal, 20 na região de transição e 90 no leito de cheia. E na horizontal por 25 elementos na zona da água e 15 na zona de ar (4.4). A malha é ainda constituída por 100 elementos longitudinais ao longo do canal para um comprimento de 5 metros e por 200 elementos quando o canal tem 10 metros de comprimento.

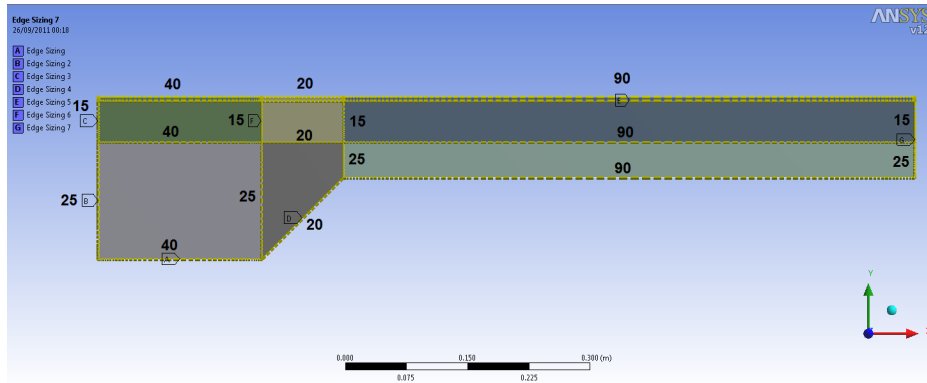


Figura 4.4: Número de elementos presentes na malha

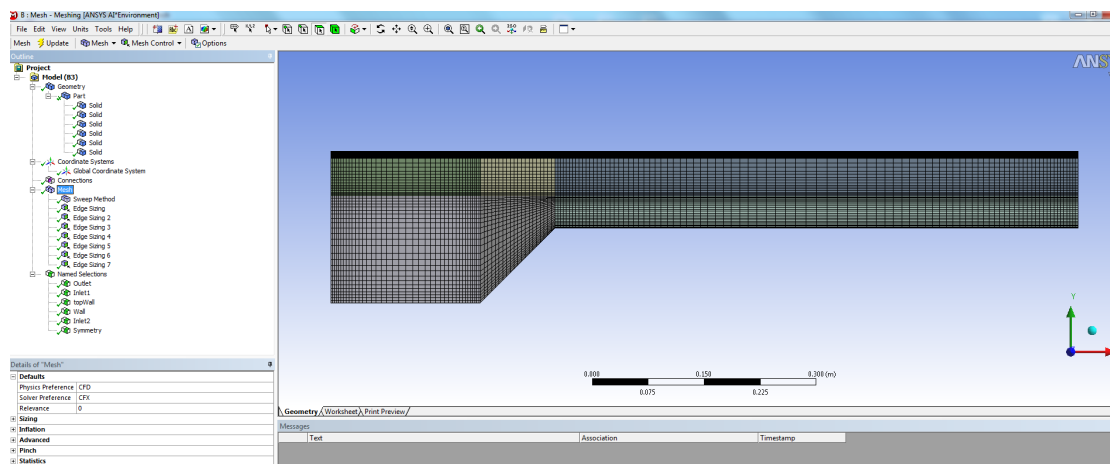


Figura 4.5: Modelação da malha no Mesh do ANSYS®

4.2.3 Processador(CFX)

No CFX-Pre são escolhidas as condições do escoamento, definição das condições do eixo de simetria de modo a que o escoamento se processe de maneira correcta, definição da rugosidade de 0.15 mm (*no slip*) no fundo e parede lateral e do LC (Figura 4.6). Enquanto que na zona superior do ar optou-se por um definição de rugosidade *free slip* de modo a que o escoamento de ar se processe sem existir atrito no topo do domínio cálculo, existindo a influência desta fronteira na superfície livre.

É também no CFX-Pre que são inseridas as condições iniciais de escoamento, as velocidades de escoamento no leito principal e no leito de cheia. Essas velocidades são obtidas através da seguinte equação:

$$U = \frac{Q}{S} \quad (4.1)$$

Onde U é a velocidade calculada, Q o caudal experimental e S a área da secção em questão.

No CFX-(*Solver Control*) foi escolhido o número de iterações a realizar. No presente estudo adoptou-se o valor de 2000 com uma escala de tempo de 0.05 segundos.

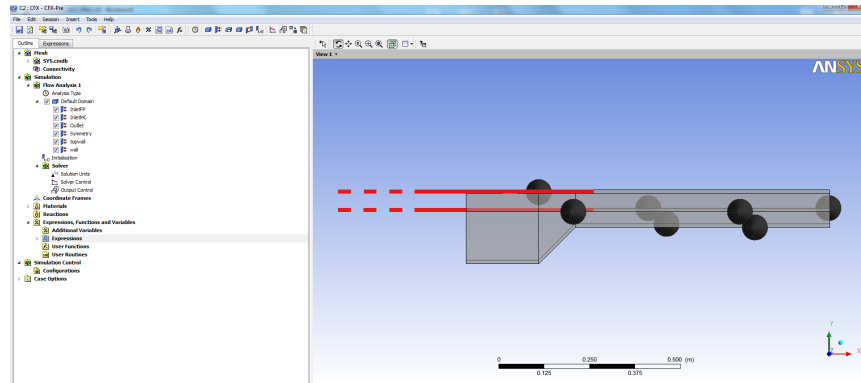


Figura 4.6: Modelação das condições de escoamento no CFX-Pre do ANSYS®

4.3 Validação do Modelo

Como foi dito anteriormente foi usado um modelo de subdivisão do canal em dois trechos de 5 metros cada de modo a reduzir o esforço computacional caso contrário seria efectuar as simulações impossível num computador usual.

Depois de simulado o primeiro trecho do modelo, foram extraídos os resultados não exactamente da fronteira a jusante (*outlet*), mas sim da secção transversal localizada 1 metro a montante. Com esta escolha pretendeu-se evitar a influência da fronteira de jusantes nos resultados. Posteriormente foram introduzidos os resultados de jusante (*outlet*, secção 4 metros) na fronteira a montante (*inlet*), tendo sido necessário proceder a uma alteração geométrica, eliminando as subdivisões da secção pois já não existe um fronteira de velocidades bem definida entre leito principal e leito de cheia. Depois destas alterações procedeu-se a nova simulação e extracção de resultados para se poder comparar os valores obtidos na primeira simulação com a segunda.

Tiago (2011) tinha notado uma variação de caudal na região de separação/união dos modelos para um escoamento de regime uniforme de $h_r=0.3$, essa variação deve-se a um erro de modelação da geometria do canal, onde não foi tida em conta a inclinação na região de interface ar-água como tal, é natural que tenham existido perdas de água que originem uma discrepância de caudais.

Para verificar a adequabilidade da metodologia de simular a totalidade do canal em dois trechos, apresenta-se nas Figuras 4.7 a 4.11 evoluções longitudinais dos caudais totais, dos caudais em cada leito e da altura do escoamento para as simulações realizadas. As siglas RU e RNU dizem respeito aos regimes uniformes e não uniformes, respectivamente, e as percentagens -19, +19, +42 e +60 referem-se ao desequilíbrio imposto a montante no caudal do leito de cheia (para mais detalhes consultar secções 5.1 e 6.1).

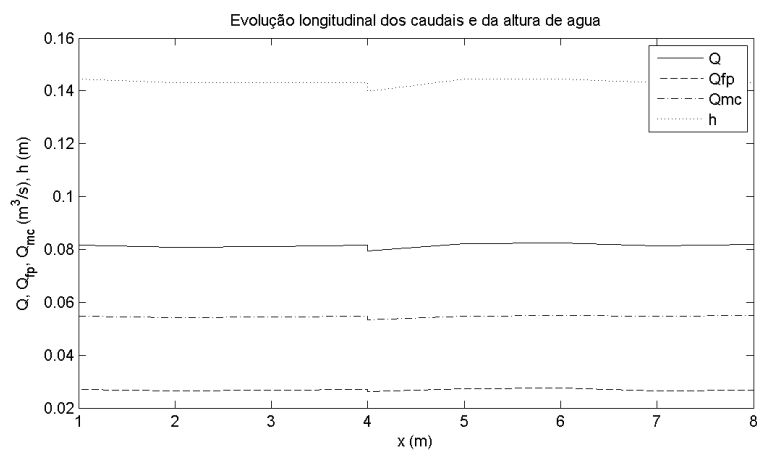


Figura 4.7: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RU

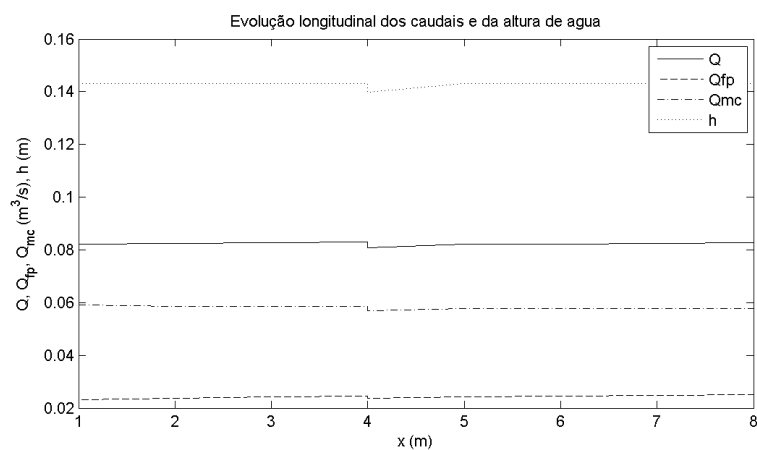


Figura 4.8: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU -19%

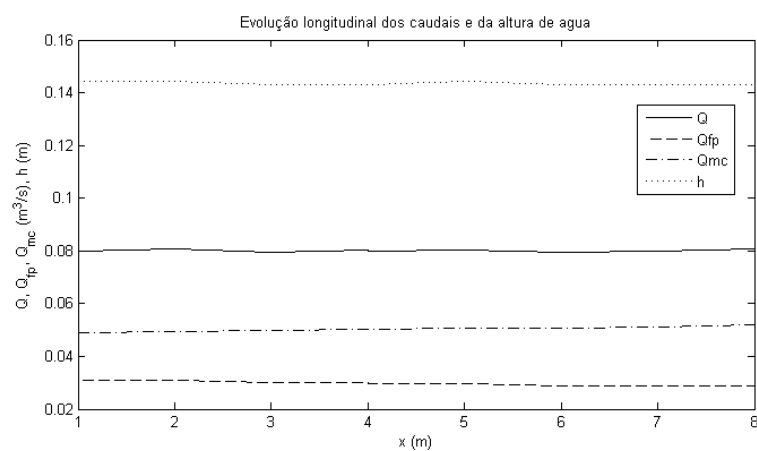


Figura 4.9: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +19%

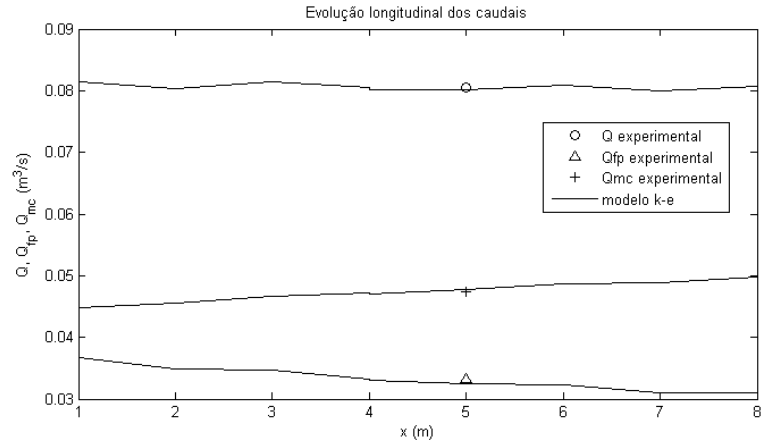


Figura 4.10: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +42%

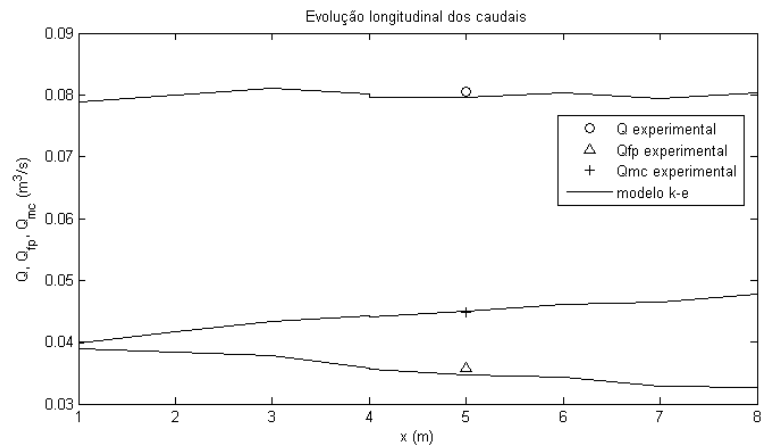
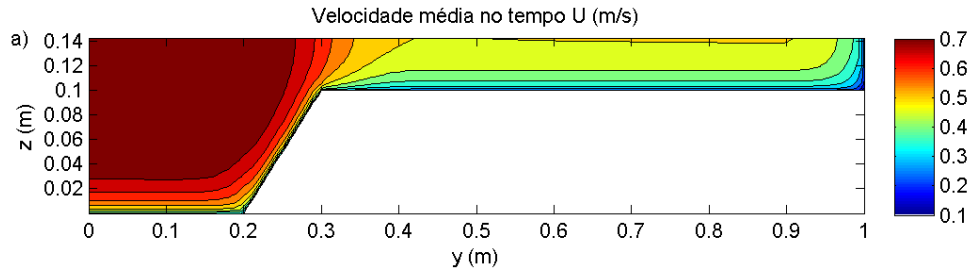


Figura 4.11: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +60%

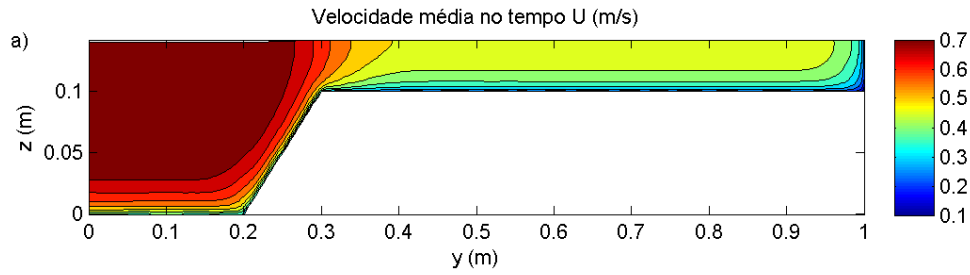
Como se pode observar nas Figuras 4.7 e 4.8 existe uma discrepância de caudais e de alturas de água na secção onde o canal foi dividido em dois trechos ($x=4m$)

Também se notam alterações nas isolinhas correspondentes à velocidade U , na secção final (*outlet*) do primeiro trecho e na secção inicial (*inlet*) do segundo trecho que podem ser observadas nas Figuras 4.12 e 4.13.

Assim pode-se concluir que o modelo de partição não pode ser usado nas simulações de regime uniforme (RU) e regime não uniforme (RNU) para uma variação de -19%. Como alternativa será usado o modelo com a totalidade normal com 10 metros para as respectivas simulações.

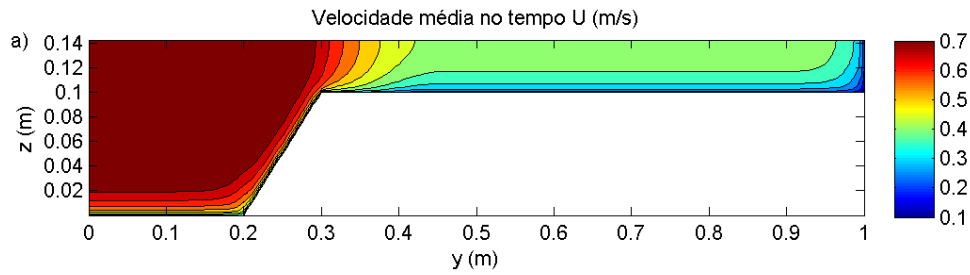


(a) X4000 (*inlet*) para RU

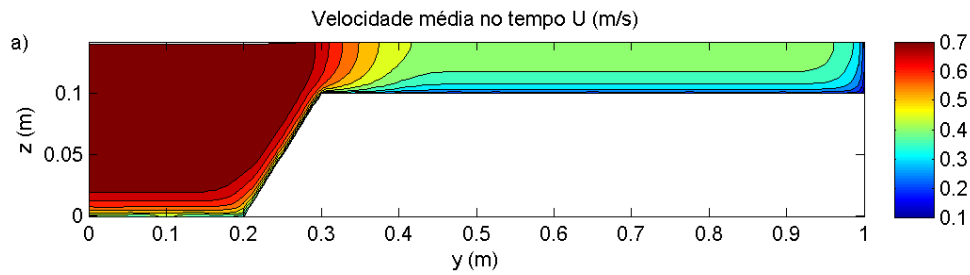


(b) X4000 (*inlet*) para RU

Figura 4.12: Isolinhas correspondentes à velocidade média U para X4000 (*outlet*) e (*inlet*) para RU



(a) X4000 (*inlet*) para RNU -19%



(b) X4000 (*inlet*) para RNU -19%

Figura 4.13: Isolinhas correspondentes à velocidade média U para X4000 (*outlet*) e (*inlet*) para RNU -19%

Capítulo 5

Simulação de escoamentos uniformes

5.1 Introdução

O presente capítulo tem como objectivo a apresentação e discussão de resultados numéricos e comparação com ensaios experimentais realizados no LNEC. É importante referir que a comparação de resultados ficou desde logo limitada aos dados experimentais fornecidos e recolhidos por Teixeira (2011), sendo que se irá proceder a uma análise mais aprofundada apenas dos resultados numéricos.

A simulação em regime uniforme (RU) é constituída pelos valores experimentais fornecidos pelo LNEC, entre os quais se vão comparar as secções X3000, X5000 e X7500, referentes às posições ao longo do canal a 3.0, 5.0 e 7.5 metros de entrada, respectivamente.

Para modelação numérica foram usadas as velocidades iniciais do LP e LC dos ensaios experimentais, respectivamente $U_{lp}=0.723$ (m/s) e $U_{lc}=0.443$ (m/s), iguais em todas as células da malha nas respectivas zonas o que limita e obriga a um "*warm up*" do modelo, ou seja, eliminação dos dois primeiros metros.

Vão ser analisados os seguintes dados:

- Evolução longitudinal do caudal total e dos caudais em cada leito de cheia (LP e LC)
- Evolução de velocidades U, V e W ao longo do canal
- Comparação de velocidades numéricas e experimentais ao longo do canal
- Energia cinética turbulenta
- Evolução longitudinal das tensões de Reynolds XY e XZ

5.1.1 Tratamento e análise de dados

No tratamento e análise de dados foi detectado que o modelo precisava de um "aquecimento", conhecido por "*warm up*". Isto é, o modelo não assume inicialmente um escoamento único mas sim dois escoamentos parciais, devido a uma introdução separada dos valores iniciais para o LC e LP, o que resulta na eliminação das secções X1000 e X2000 pois os seus valores não são reais e introduzem erros na análise comparativa de todas as secções.

Uma das grandes diferenças entre os gráficos de isolinhas do modelo numérico para o experimental tem a ver com as leituras efectuadas por Teixeira (2011), este apenas recolheu informações desde o fundo do canal até 90% da altura (aproximadamente 1.3m) e em alguns casos apenas até 80% da altura (aproximadamente 1.15m) na região do LP e não foram efectuadas medições a 0.05m das paredes laterais muito possivelmente devido a limitações do aparelho de leitura das velocidades, assim se explica a ausência de valores na totalidade do canal.

5.2 Resultados da simulação RU

5.2.1 Evolução longitudinal de caudais e alturas

Observando as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 é possível verificar que com a simulação obteve-se bons resultados muito semelhantes aos experimentais. Além disso a simulação correu conforme o previsto modelando a altura de água e caudais praticamente constantes dado tratar-se de uma simulação em regime uniforme.

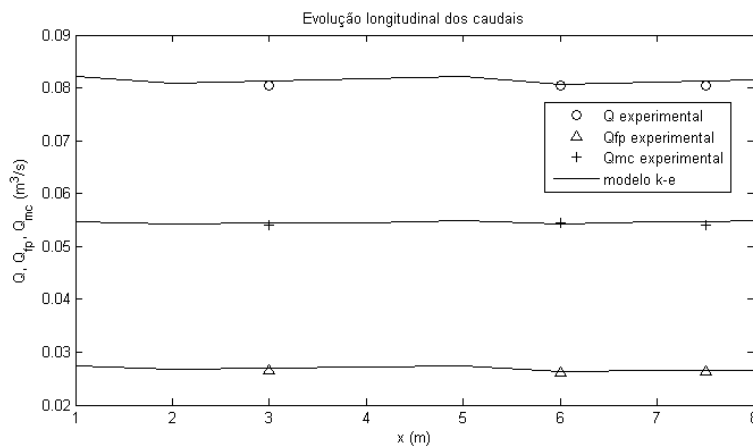


Figura 5.1: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RU

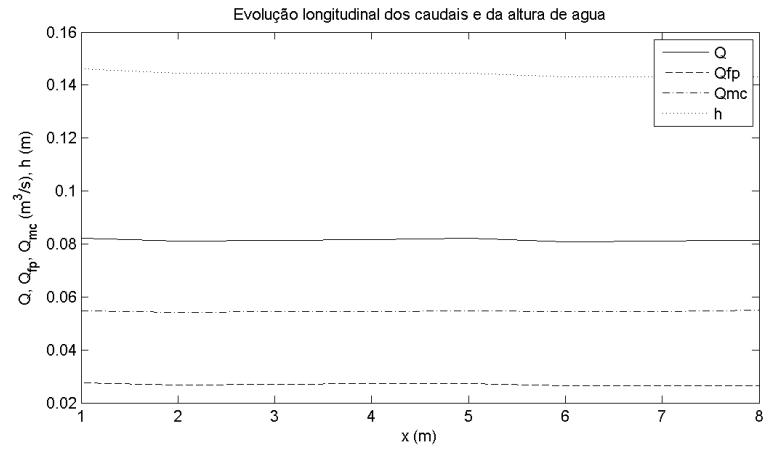


Figura 5.2: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RU

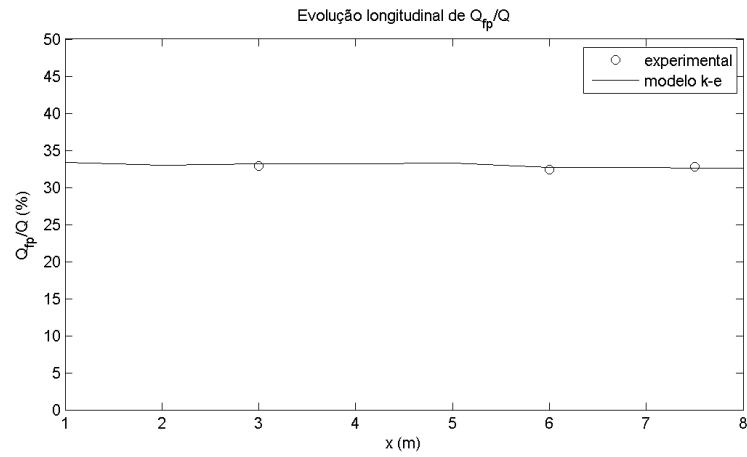


Figura 5.3: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para o leito de cheia para RU

5.2.2 Desenvolvimento da camada limite

Na Figura 5.4 é possível observar a evolução dos perfis verticais ao longo do canal para as secções X3000, X5000 e X7500. O gráfico representa o desenvolvimento da camada limite, para uma profundidade elevada até $Z=0.05$ m as velocidades na três secções são semelhantes o que vai de encontro ao descrito por Massey (2002). A partir de $Z=0.06$ m começa-se a notar o desenvolvimento da camada limite com variações de velocidades, deixando de existir uma secção vertical passando para uma secção curva, demonstrando assim a influência do fundo no desenvolvimento da camada limite. Tais variações são possíveis de se ver em maior pormenor na Figura 5.9, onde se apresentam as isolinhas para as velocidades médias no tempo U .

Como se pode observar na Figura 5.9 ao longo das secções existe uma evolução notória nas isolinhas da velocidade, vão se afastando do fundo o que representa um aumento de velocidade.

Este efeito é mais notório no LP, onde a altura de água é maior e, consequentemente a camada limite necessita de mais espaço para se desenvolver. Não é possível verificar a influência da subcamada viscosa pois não foi calculada, em vez disso é usada a Lei da Parede que usa a função logarítmica para descrever a velocidade do fluido ao longo da região da parede, Sofialidis & Prinos (1998).

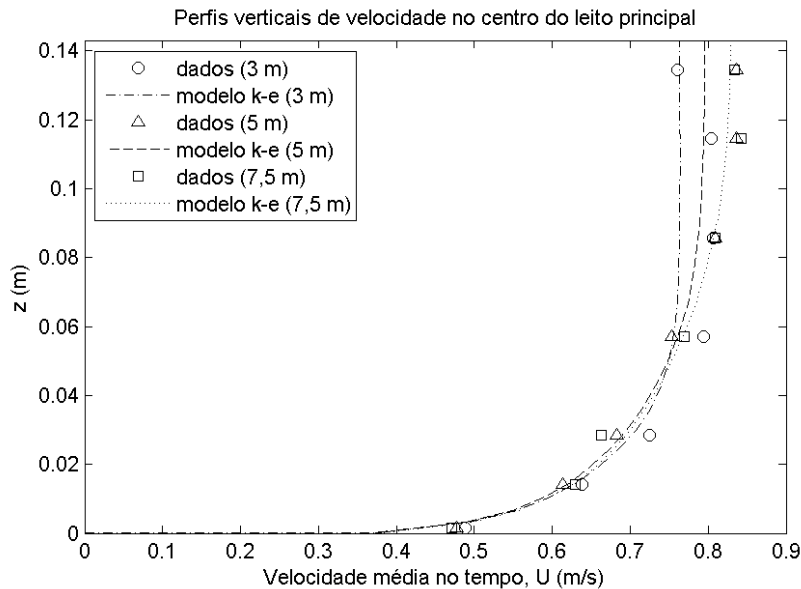


Figura 5.4: Perfis verticais de velocidades para RU

5.2.3 Comparação do modelo numérico com experimental

Na comparação das velocidades médias no tempo U entre o modelo numérico e experimental pode-se verificar que se situam na mesma ordem de grandeza, apesar de serem ligeiramente superiores no modelo experimental não só no fundo do canal LP mas também na região da interface e LC junto à superfície livre.

O desenvolvimento da camada de mistura é mais notório nos dados experimentais do que no modelo numérico. Isto indica que o modelo isotrópico $k-\varepsilon$ não reproduz com exactidão a turbulência gerada na camada de mistura.

Apesar das diferenças apresentadas anteriormente os resultados são, além da mesma ordem de grandeza, semelhantes. Reproduzem os mesmos fenómenos, diminuição de velocidade no fundo e aumento de velocidade junto à superfície livre. Como tal pode-se afirmar que a presente modelação e simulação produziu resultados fiáveis.

Nota-se o facto de ter sido usado uma malha mais refinada nos fundos, paredes, zonas de interface e superfície livre onde os fenómenos têm uma maior importância.

5.2.4 Desenvolvimento da camada de mistura

As velocidades longitudinais médias em profundidade, U_p representadas na Figura 5.5 demonstram a existência de uma camada de mistura para os modelos numéricos e experimentais. Analisando o LP é possível verificar uma evolução das velocidades médias ao longo do escoamento, facto esperado e já analisado (Capítulo 5). Nota-se também uma evolução das velocidades no LC.

Como se pode observar nas Figuras 5.9 e 5.10 existe uma evolução da camada de mistura, aumentando ligeiramente a sua largura ao longo do canal, é ainda notória uma maior largura para o caso experimental.

Pelo que se pode afirmar que o modelo numérico subestima a dimensão da camada de mistura. Genericamente, pode-se concluir que o modelo $k-\varepsilon$ reproduz com algum rigor os dados experimentais referentes à distribuição transversal da velocidade média em profundidade.

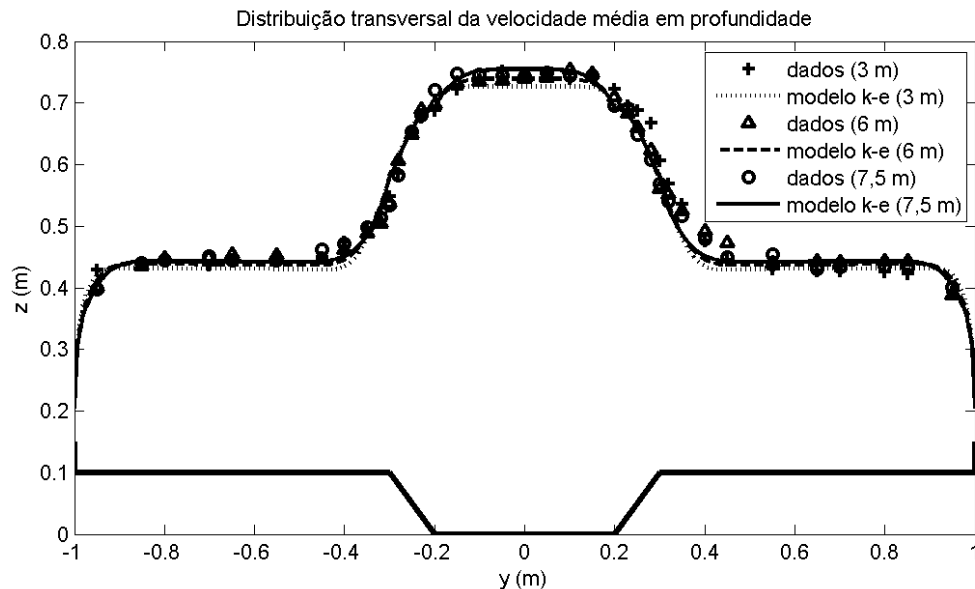


Figura 5.5: Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos

5.2.5 Correntes secundárias

O fenómeno das correntes secundárias (ver Figura 2.2) é praticamente inexistente na presente simulação como se pode observar nas Figuras 5.11 e 5.12, existe uma evolução das isolinhas de V e W mas numa escala muito reduzida sendo a escala máxima das isolinhas cerca de 0.005 m/s, estes resultados vão de encontro às limitações do modelo $k-\varepsilon$. De facto, tratando-se de um modelo de turbulência isotrópico é previsível que não consiga reproduzir as correntes secundárias que são geradas pela anisotropia da turbulência nas fronteiras sólidas.

Segundo Nezu (1994) e Tominaga & Nezu (1991), a altura do LC, h influencia o desenvolvimento de correntes secundárias (vórtices helicoidais com eixo longitudinal), sendo que um maior valor h correspondem correntes secundárias mais fortes, conseguindo reproduzir os vórtices longitudinais, criando nos gráficos de isolinhas das velocidades médias no tempo U (Figura 5.9 e Figura 5.10) uma variação das isolinhas na região da interface, representado por isolinhas com concavidade negativa resultantes do aumento de velocidade gerado pelas correntes secundárias. E também nos gráficos de isolinhas das velocidades médias no tempo W (Figura 5.12) uma estrutura de isolinhas circulares na região de interface representando os vórtices horizontais capazes de gerar um aumento de velocidade em U .

Verifica-se então que o modelo $k-\epsilon$ não foi capaz de reproduzir com exactidão as correntes secundárias para um escoamento RU com $h=0.043$ e $\frac{h'}{H}=0.7$.

Já Nezu (1994) tinha verificado que uma simulação numérica de um canal de secção composta com $\frac{h'}{H}=0.75$ não produzia resultados fiáveis ao contrário de $\frac{h'}{H}=0.25$ e $\frac{h'}{H}=0.50$, representam respectivamente resultados elevados de h .

5.2.6 Análise da estrutura turbulenta

Para a análise da estrutura turbulenta foram tidas em conta:

- Tensões de Reynolds XY
- Tensões de Reynolds XZ
- Energia cinética turbulenta
- Tensão de arrastamento junto ao fundo

Como não existem dados experimentais para proceder a uma comparação e melhor avaliação terá de ser feita uma análise exclusiva do ensaio numérico.

Foram estudadas unicamente as Tensões de Reynolds XY e XZ pois eram as únicas que apresentavam resultados com evolução ao longo do canal passíveis de análise e estudo. As restantes tensões XX, YY, ZZ e YZ apresentam resultados quase nulos.

Através da análise da Figura 5.7 é possível entender que existe uma relação directa entre as tensões de Reynolds e a transferência da quantidade de momento, sendo essa uma relação de perpendicularidade. Assim torna-se também necessário analisar em conjunto os gráficos de isolinhas das velocidades médias U e respectivos vórtices horizontais.

Já as tensões de Reynolds no plano XZ são, essencialmente, resultantes da transferência de momento proveniente da turbulência do fundo do canal provocada pela rugosidade do canal.

De acordo com a hipótese de Boussinesq (e.g. (Pope, 2000)) as tensões de Reynolds podem ser descritas através da seguinte equação:

$$\tau_{xy} = \varepsilon \left(\frac{\partial U_d}{\partial y} \right) \quad (5.1)$$

Na Equação (5.1) demonstra-se a relação directa das tensões de Reynolds com a dissipação da energia cinética turbulenta (ε) e o gradiente de velocidade ($\frac{\partial U_d}{\partial y}$).

Como se pode observar na Figura 5.13 e Figura 5.14 regista-se um aumento das tensões ao longo do canal junto ao fundo do LP e na região da interface, para o LC esse desenvolvimento é menos visível.

Considerando a Equação (5.1) é possível verificar que aumento da velocidades médias verificado nas Figuras 5.9, 5.11 e 5.12 e consequente aumento dos seus gradientes de velocidade ($\frac{\partial U_d}{\partial y}$), provoca um o aumento de tensões das Reynolds respectivamente.

A energia cinética turbulenta aumenta no fundo do LP e na região da interface como se pode observar na Figura 5.15, tais alterações são consequência do aumento da produção de turbulência verificado no fundo do canal. Em relação à zona da interface (camada de mistura) o aumento pode ser explicado pela existência de estruturas turbulentas (vórtices de eixo vertical).

A Figura 5.6 representa uma comparação da distribuição transversal das tensões de arrastamento sendo notório que os seus pontos máximos de tensão se situam na região da interface e respectiva camada de mistura. Numa maneira geral o modelo é capaz de simular as tensões de arrastamento pois os valores experimentais apresentam a mesma geometria transversal incluindo as inflexões verificadas. Em relação ao nível de fiabilidade do modelo é visível um certo afastamento dos resultados numéricos e experimentais possivelmente resultante de um erro de calibração da rugosidade por parte de Teixeira (2011) que assumiu valores mais baixos do que são na realidade.

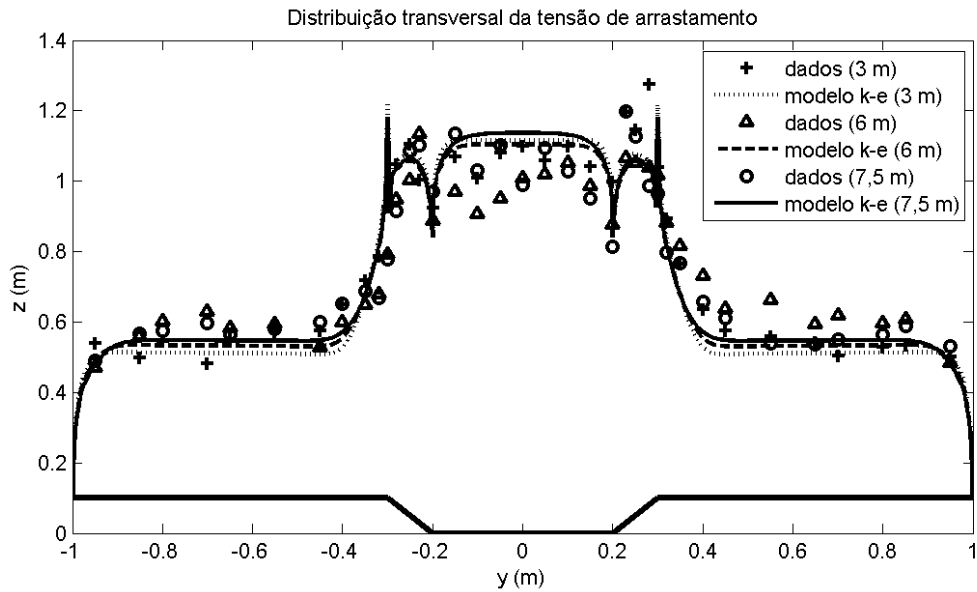


Figura 5.6: Distribuição transversal das tensões de arrastamento, dados experimentais e numéricos

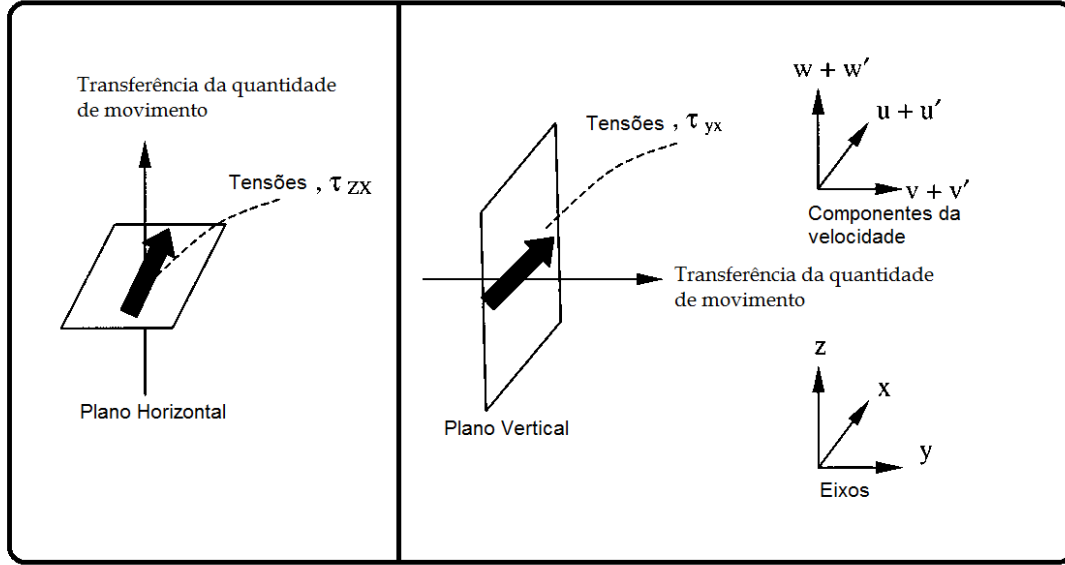


Figura 5.7: Tensões de Reynolds no plano vertical e horizontal, adaptada de Babaeyan-Koopaei *et al.* (2002)

5.2.7 Avaliação da performance do modelo

A presente simulação foi gerada através de um modelo do canal com 10 metros de comprimento que, como se previa não iria ter falhas na modelação de alturas de água, caudais e velocidades como ocorreu para a mesma simulação com o canal dividido em dois troços de 5 metros já descrito anteriormente no Capítulo 4.

Em relação à performance do modelo $k-\epsilon$ foi evidente a sua boa produção de resultados de velocidades médias U , anteriormente comparadas com as experimentais. Já no que diz respeito aos fenómenos dos vórtices verticais e horizontais o modelo $k-\epsilon$ não os consegue reproduzir fidedignamente apenas é possível obter uma ideia da sua existência.

Comparando os resultados com Filonovich *et al.* (2010) pode-se concluir que o facto de modelo adoptado no presente trabalho (modelo 10 metros contínuo) apresenta melhores resultados. Possíveis erros ou incoerências nos resultados apresentados por Filonovich *et al.* (2010) já foram explicados no Capítulo 4.

Como foi referido por Brito (2011) a alteração da altura jusante do escoamento interfere directamente com o melhoramento dos resultados servindo para atingir um regime uniforme, no presente estudo essa altura foi mantida constante e igual, e com uma pressão hidrostática. Sendo assim é possível admitir que a performance do modelo é afectada pelo facto da altura a jusante ter sido mantida inalterada.

Esta alteração de alturas poderia ajudar a explicar a variação, aumento da velocidade média transversal no LC verificada na Figura 5.5 no sentido de atingir um regime uniforme quando na realidade os valores de U_{lp} e U_{lc} já são referentes a um regime uniforme.

Observando a Figura 5.8 onde se apresentam os resultados numéricos e experimentais de U em cada ponto, constata-se que os valores experimentais são, em geral, superiores aos numéricos. Uma explicação para esta diferença reside na condição de fronteira a jusante no modelo numérico, que poderá não corresponder exactamente à altura do regime uniforme da simulação numérica.

Assim, os resultados indicam que a altura imposta a jusante no modelo, igual à medida experimentalmente, deveria ser ligeiramente menor fazendo com que as velocidades aumentassem.

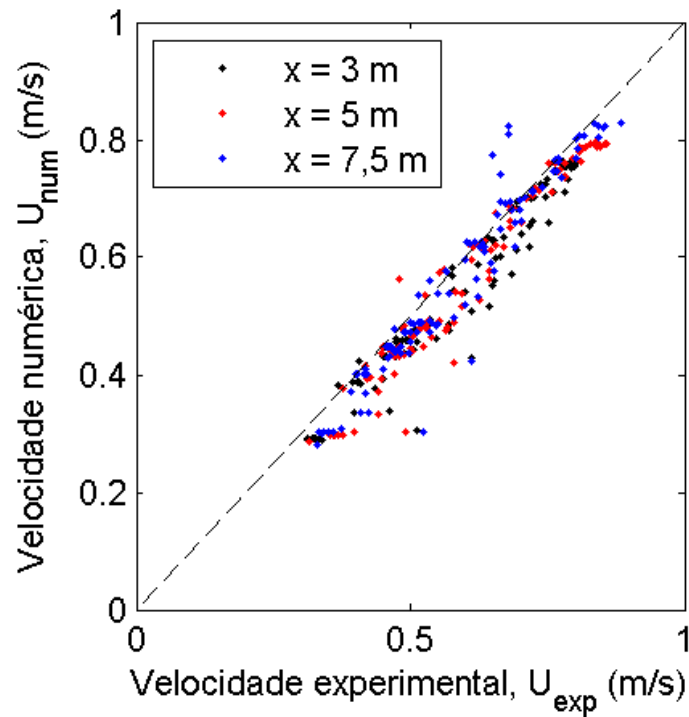


Figura 5.8: Performance do modelo numérico com modelo experimental para secções X3000, X5000, e X7500 em regime uniforme

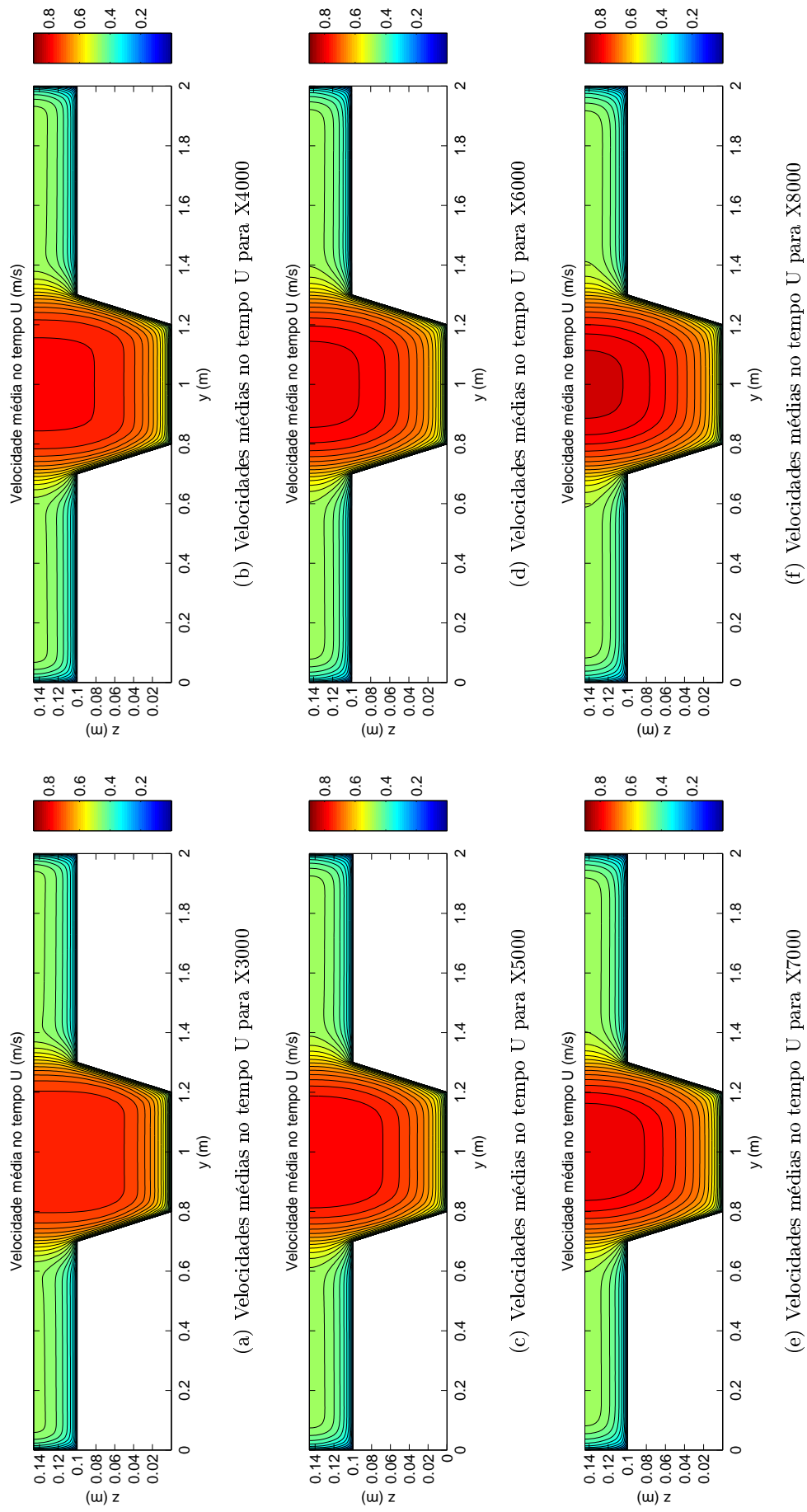


Figura 5.9: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos no regime uniforme

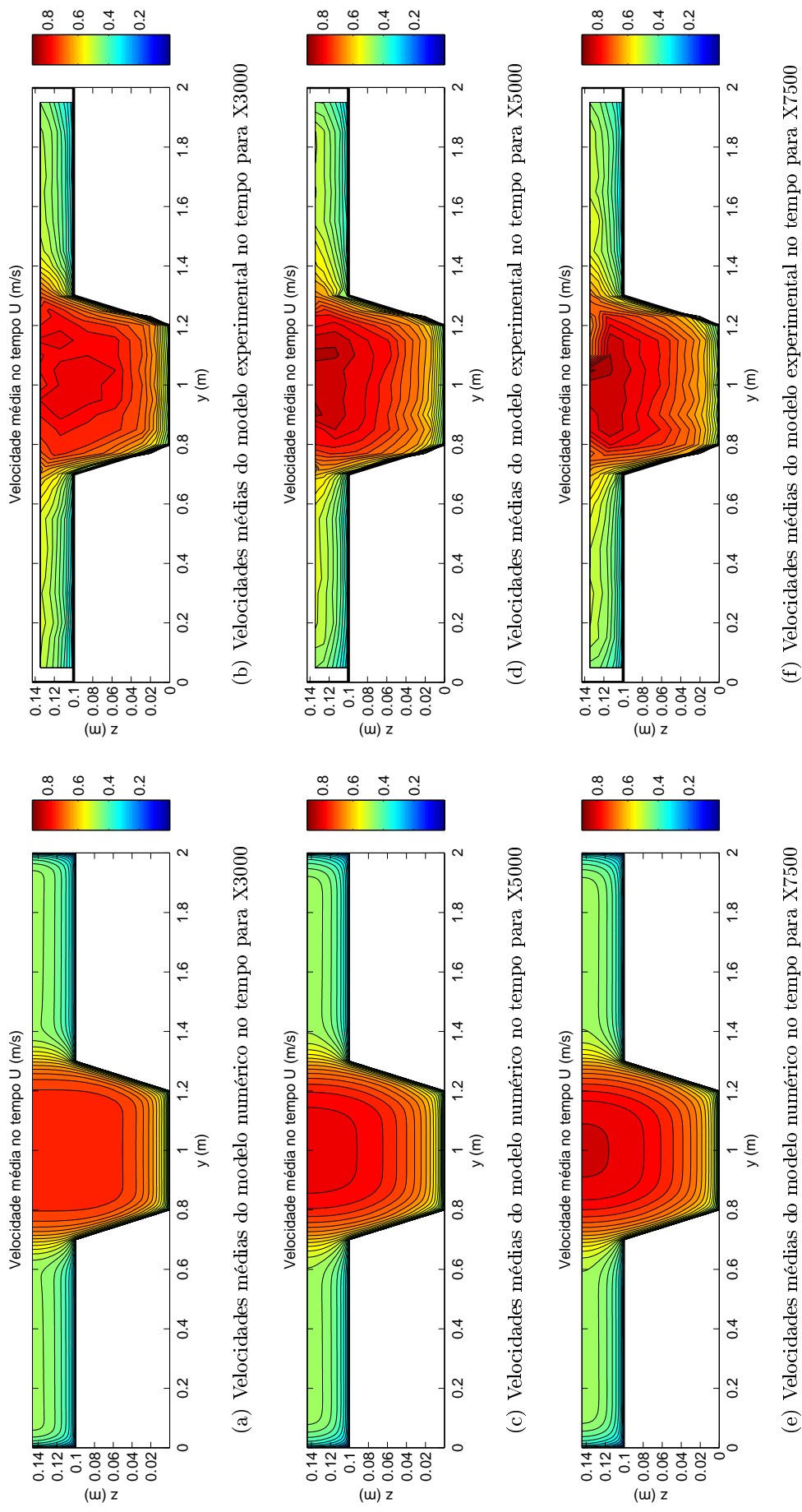


Figura 5.10: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais no regime uniforme

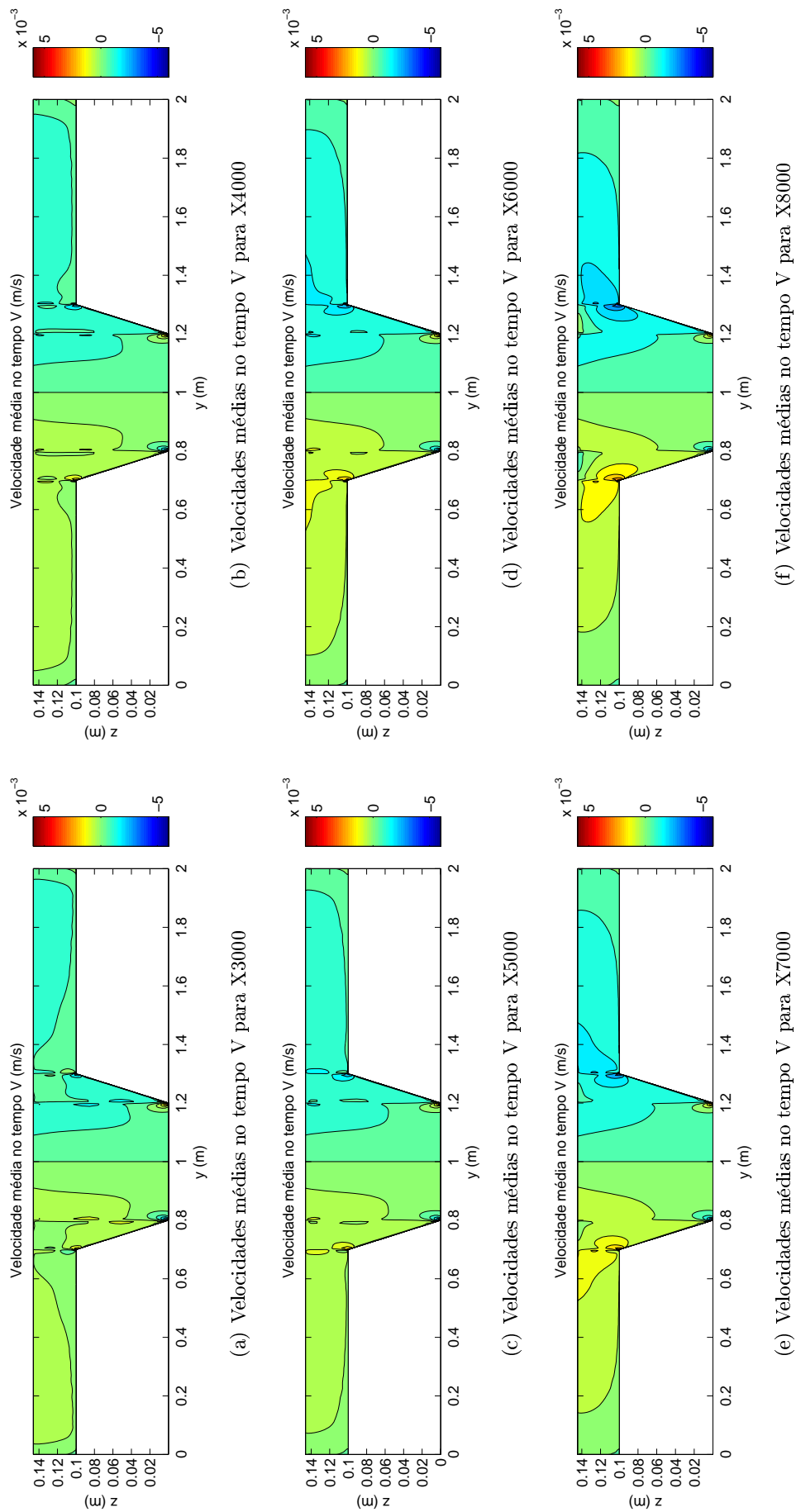


Figura 5.11: Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos no regime uniforme

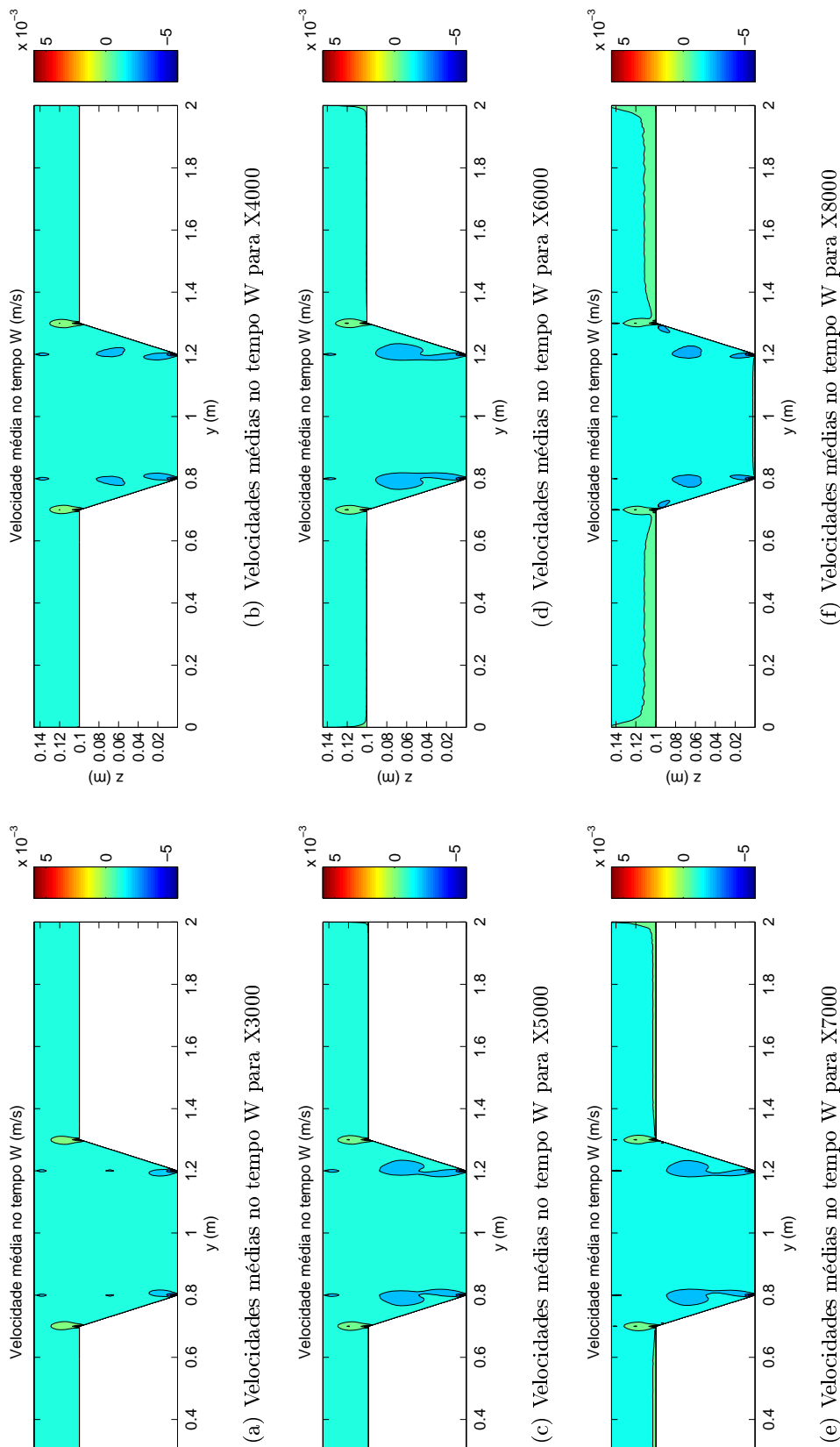


Figura 5.12: Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos no regime uniforme

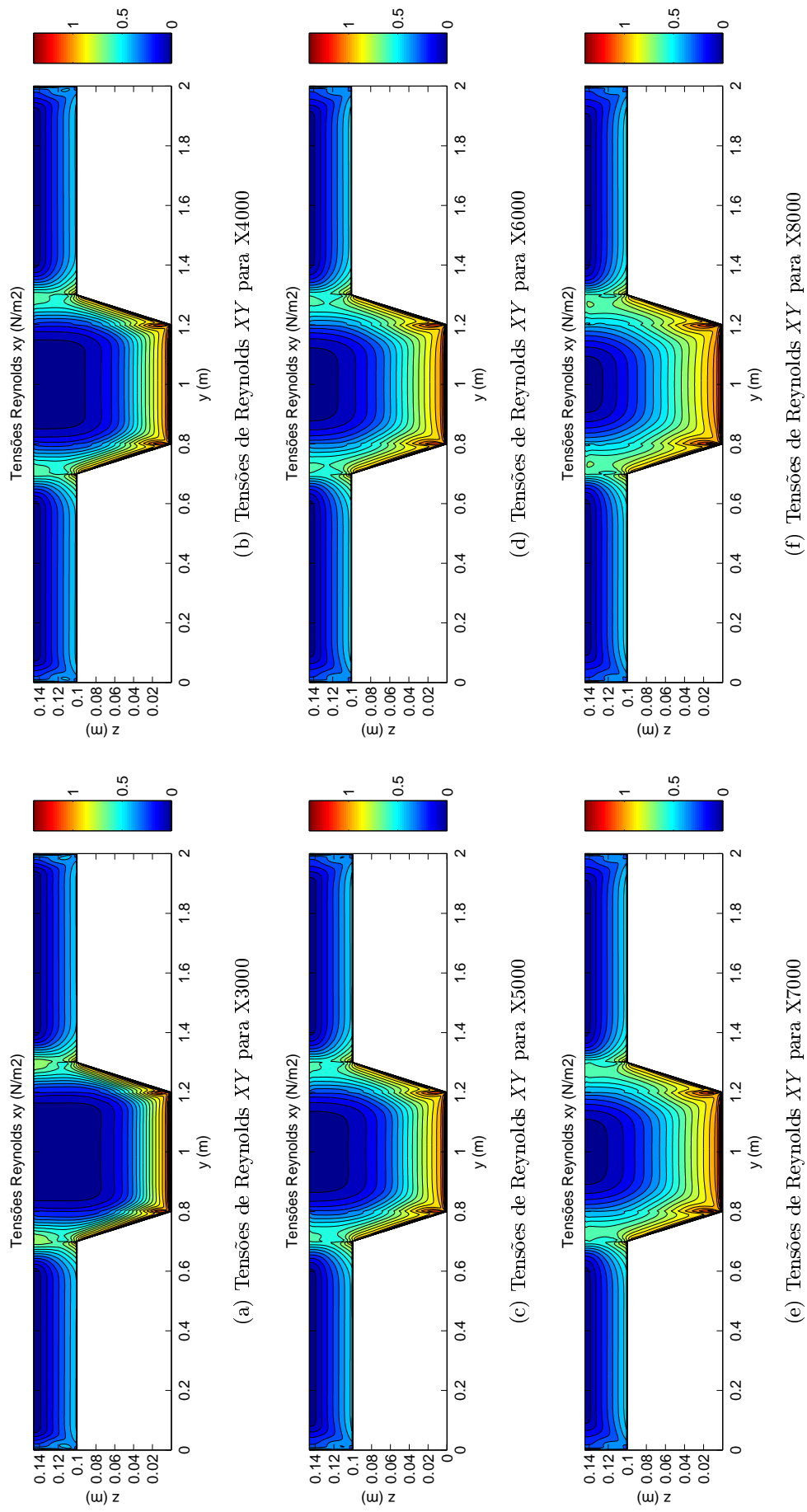


Figura 5.13: Tensões de Reynolds XY para regime uniforme

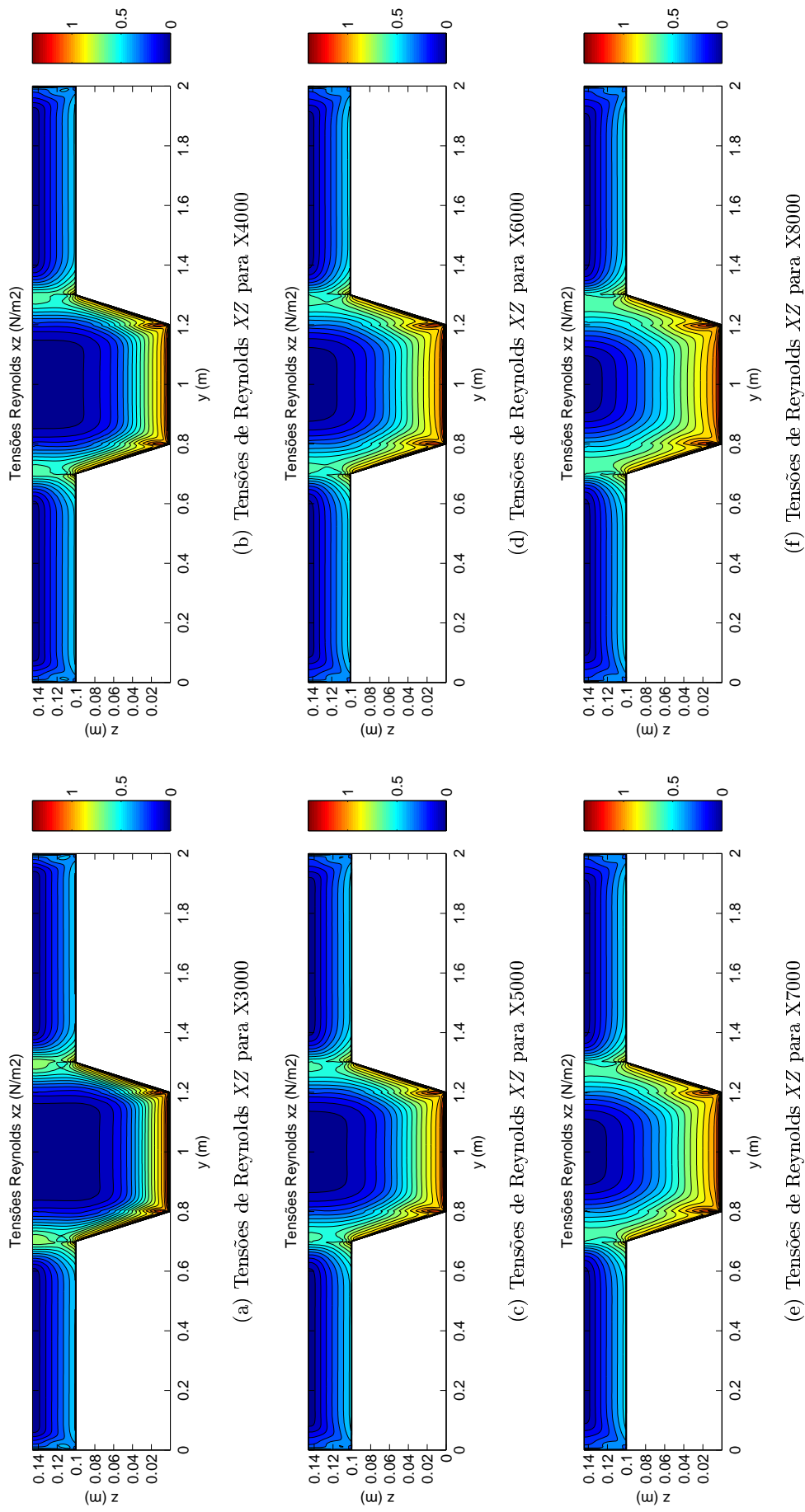
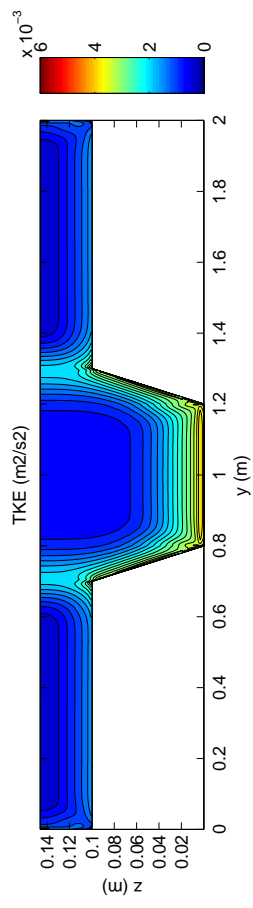
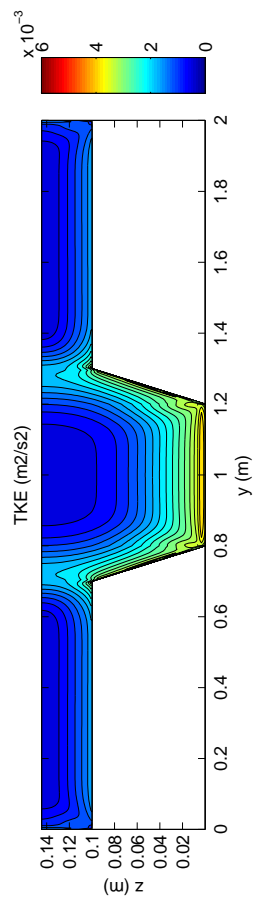


Figura 5.14: Tensões de Reynolds XZ para regime uniforme

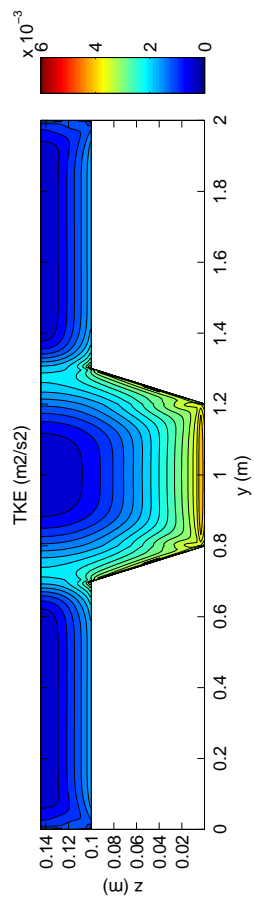


(a) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X3000



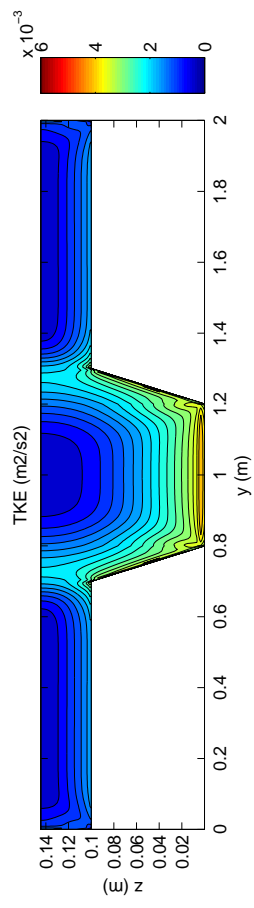
(b) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X4000

(c) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X5000



(d) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X6000

(e) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X7000



(f) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X8000

Figura 5.15: Isolinhas da energia cinética turbulenta para regime uniforme

Capítulo 6

Simulação de escoamentos não uniformes

6.1 Introdução

As simulações em regime não uniforme (RNU) são constituídas pelos valores experimentais fornecidos pelo LNEC, entre os quais se vão comparar as secções X3000, X5000, X6000 e X7500. O presente capítulo pode ser dividido em simulações de sobrealimentação (+19 %, +42 % e +60 %) e subalimentação (-19 %) do LC. As percentagens referem-se ao excesso ou ao défice de caudal inicialmente introduzido no LP relativamente ao caudal inicialmente introduzido no LC em regime uniforme.

Na Tabela 6.1 apresentam-se as secções que iram ser comparadas para cada uma um dos regimes estudados. Na Tabela 6.2 apresentam-se os correspondentes valores das velocidades iniciais no LP e no LC que foram introduzidas no modelo e que correspondem aos caudais medidos experimentalmente.

Tabela 6.1: Secções transversais a comparar entre resultados numéricos e experimentais

Variações de Caudal	X3000	X5000	X6000	X7500
-19 %		X		
+19 %	X	X	X	X
+42 %		X		
+60 %		X		

As simulações em RNU advêm de alterações do caudal de entrada inicial no leito de cheia, e as percentagens são relativas proporções do valores de regime uniforme, $U_{lc}=0.443$ (m/s).

Tabela 6.2: Velocidades iniciais de simulação

Variações de Caudal	L.P. (m/s)	L.C. (m/s)
-19 %	0.7889	0.377
+19 %	0.642	0.528
+42 %	0.576	0.617
+60 %	0.511	0.692

6.2 Resultados da simulação RNU -19%

6.2.1 Evolução longitudinal de caudais

Observando as Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 é possível verificar que com a simulação obteve-se bons resultados muito semelhantes aos experimentais. Além disso a simulação correu conforme o previsto, aumentando o caudal e altura de água do LC ao longo do canal, pois inicialmente foi imposta uma redução da sua velocidade face ao regime uniforme.

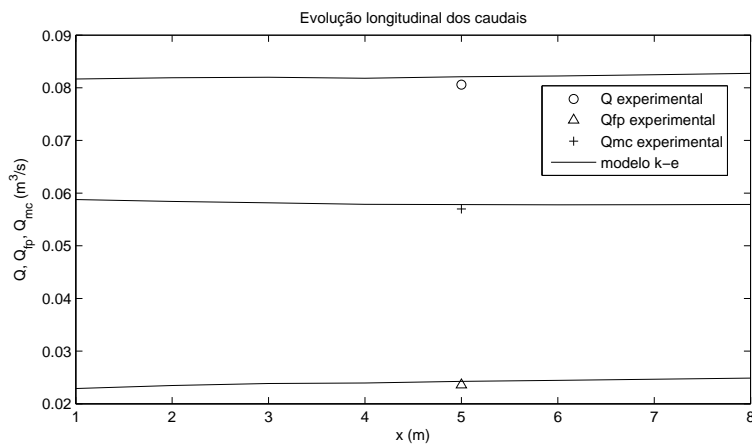


Figura 6.1: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU -19%

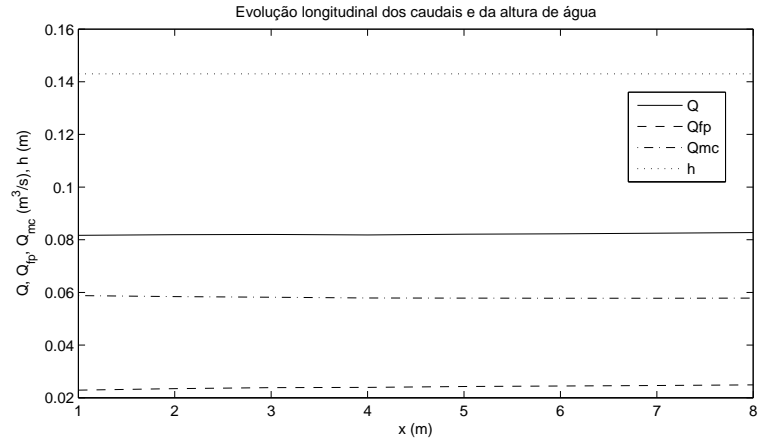


Figura 6.2: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU -19%

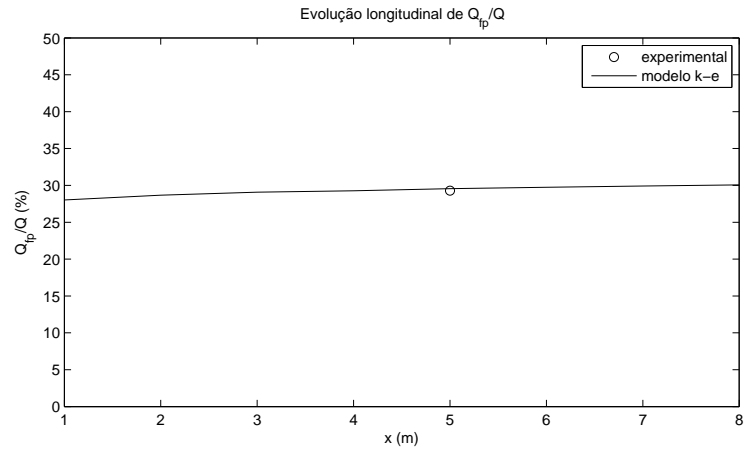


Figura 6.3: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para RNU -19%

6.2.2 Desenvolvimento da camada limite

Na Figura 6.4 é possível observar o perfil vertical de velocidade da secção X5000. O gráfico representa o desenvolvimento da camada limite, para uma profundidade elevada até $Z=0.08$ m as velocidades são semelhantes o que vai de encontro ao descrito por Massey (2002). A partir de $Z=0.07$ m começa-se a notar o desenvolvimento da camada limite com variações de velocidades, deixando de existir uma secção vertical passando para uma secção curva, demonstrando assim a influência do fundo no desenvolvimento da camada limite. Tais variações são possíveis de se ver em maior pormenor na Figura 6.9, onde se apresentam as isolinhas para as velocidades médias no tempo U .

Como se pode observar na Figura 6.9 ao longo das secções existe uma evolução notória nas isolinhas da velocidade, vão se afastando do fundo o que representa um aumento de velocidade. Este efeito é mais notório no LP, onde a altura de água é maior e, consequentemente a camada limite necessita de mais espaço para se desenvolver. Não é possível

verificar a influência da subcamada viscosa pois não foi modelada, em vez disso é usada a Lei da Parede que usa a função logarítmica para descrever a velocidade do fluido ao longo da região da parede (Sofialidis & Prinos, 1998).

É também notório o aumento das velocidades no LC pois a presente simulação consistiu em alterar a velocidade inicial do LC, diminuindo-a. O escoamento tende para RU como tal é natural que exista transferência de massa entre os LP e LC e consequente aumento da velocidade e caudal no LC como se pode observar respectivamente nas Figuras 6.9 e 6.1.

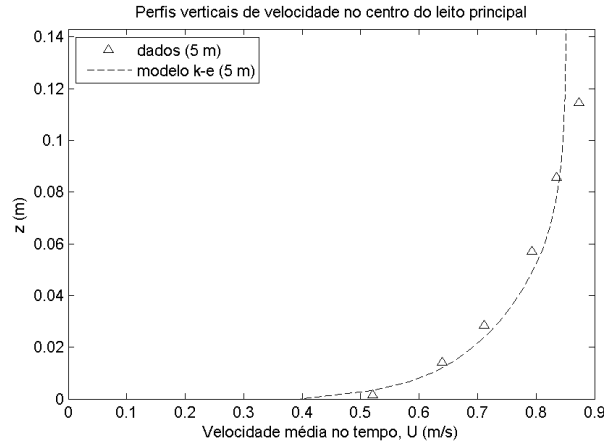


Figura 6.4: Perfis verticais de velocidades para RNU -19%

6.2.3 Comparação do modelo numérico com experimental

Na comparação das velocidades médias no tempo U entre o modelo numérico e experimental pode-se verificar que se situam na mesma ordem de grandeza, apesar de serem ligeiramente superiores no modelo experimental, só no fundo do canal LP é que se registam valores inferiores ao numérico. Na Figura 6.5 é possível verificar que para as isolinhas das velocidades médias experimentais não está representada a totalidade da secção, este facto deve-se aos resultados experimentais não estarem completos limitando assim a sua comparação.

Apesar de só haver uma secção, analisando-a, é possível verificar que o desenvolvimento da camada de mistura é mais notório nos dados experimentais do que no modelo numérico. Isto indica que o modelo isotrópico $k-\varepsilon$ não reproduz com exactidão a turbulência gerada na camada de mistura.

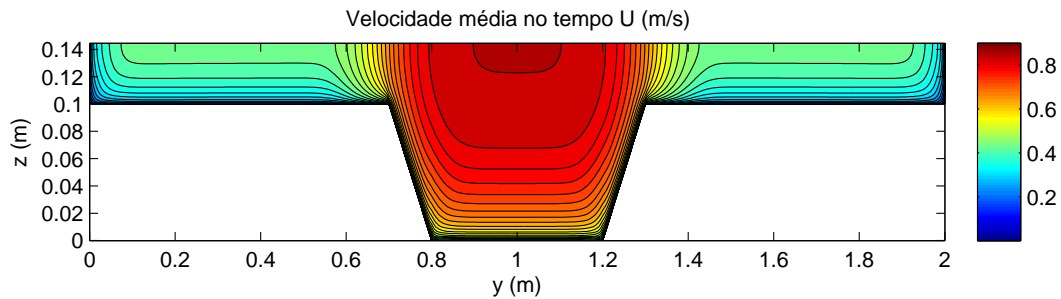
Apesar das diferenças apresentadas anteriormente os resultados são, além da mesma ordem de grandeza, semelhantes. Reproduzem os mesmos fenómenos, diminuição de velocidade no fundo e aumento de velocidade junto à superfície livre. Como tal pode-se afirmar que a presente modelação e simulação produziu resultados fiáveis.

Nota-se o facto de ter sido usado uma malha mais refinada nos fundos, paredes, zonas de interface e superfície livre onde os fenómenos têm uma maior importância.

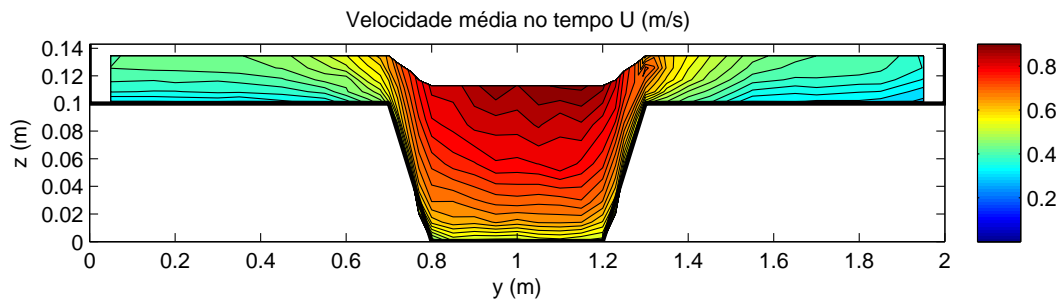
6.2.4 Desenvolvimento da camada de mistura

As velocidades longitudinais médias em profundidade, U_p representadas na Figura 6.6 demonstram a existência de uma camada de mistura para os modelos numéricos e experimentais. É possível verificar uma distribuição semelhante das velocidades médias numéricas e experimentais no LP, LC e interface. Como se pode observar na Figura 6.9 existe uma evolução da camada de mistura, aumentando ligeiramente a sua largura ao longo do ca-

nal. Analisando a Figura 6.5 é notória uma maior largura para o caso experimental. Pelo que se pode afirmar que o modelo numérico subestima a dimensão da camada de mistura. Genericamente, pode-se concluir que o modelo $k-\varepsilon$ reproduz com algum rigor os dados experimentais referentes à distribuição transversal da velocidade média em profundidade. Embora subestime os valores no LC junto à interface.



(a) Velocidades médias do modelo numérico no tempo para X5000



(b) Velocidades médias do modelo experimental no tempo para X5000

Figura 6.5: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais na posição X5000 em RNU -19%

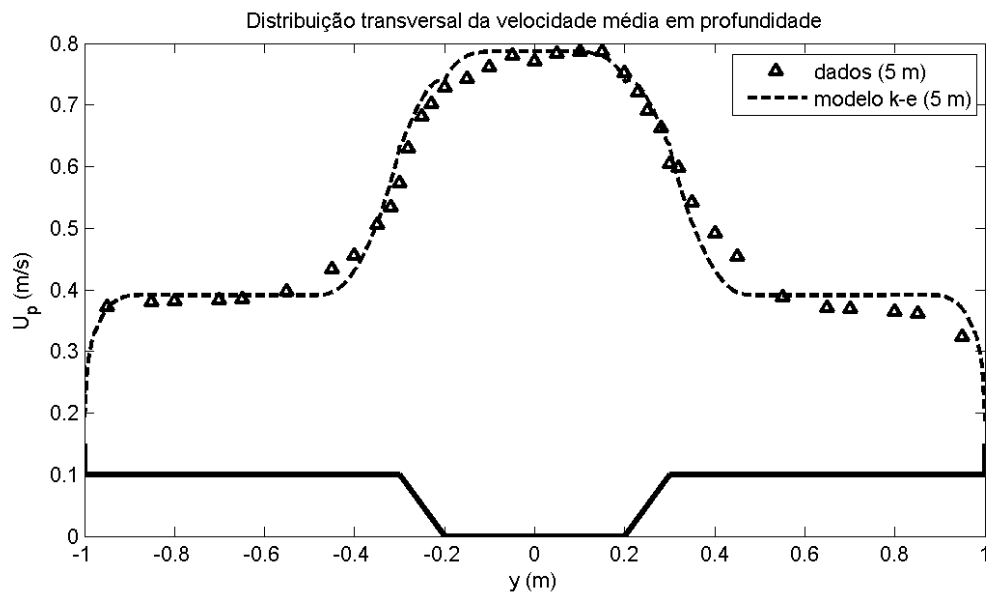


Figura 6.6: Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU -19%

6.2.5 Correntes secundárias

O fenómeno das correntes secundárias é praticamente inexistente na presente simulação como se pode observar nas Figuras 6.10 e 6.11. Existe uma evolução das isolinhas de V e W mas numa escala muito reduzida sendo a escala máxima das isolinhas cerca de 0.005 m/s, estes resultados vão de encontro às limitações do modelo $k-\varepsilon$. De facto, tratando-se de um modelo de turbulência isotrópico é previsível que não consiga reproduzir as correntes secundárias que são geradas pela anisotropia da turbulência nas fronteiras sólidas.

A altura do LC, h influencia o desenvolvimento de correntes secundárias, sendo que um maior valor h correspondem correntes secundárias mais fortes, conseguindo reproduzir os vórtices longitudinais (ver Capítulo 5). Verifica-se então que o modelo $k-\varepsilon$ não foi capaz de reproduzir com exactidão as correntes secundárias para o escoamento RNU (-19%).

Saliente-se que na Figura 6.10 é visível a transferência de massa que ocorre no LP para o LC, transferência essa que vai diminuindo para jusante.

6.2.6 Análise da estrutura turbulenta

Para a análise da estrutura turbulenta foram tidas em conta:

- Tensões de Reynolds XY
- Tensões de Reynolds XZ
- Energia cinética turbulenta (TKE)
- Tensão de arrastamento junto ao fundo

Como não existem dados experimentais das tensões de Reynolds e da energia cinética turbulenta, para proceder a uma comparação e melhor avaliação, terá de ser feita uma análise exclusiva do ensaio numérico.

Foram estudadas unicamente as Tensões de Reynolds XY e XZ pois eram as únicas que apresentavam resultados com evolução significativa ao longo do canal passíveis de análise e estudo. As restantes tensões YZ apresentam resultados quase nulos.

Torna-se necessário analisar em conjunto os gráficos de isolinhas das velocidades médias U e respectivos vórtices horizontais. As tensões de Reynolds no plano XZ são, essencialmente, resultantes da transferência de quantidade de movimento proveniente da turbulência do fundo do canal provocada pela rugosidade.

Como se pode observar na Figura 6.12 e Figura 6.13 regista-se uma diminuição das tensões ao longo do canal junto ao fundo do LP e na região da interface, para o LC esse desenvolvimento é menos visível. Essa diminuição deve-se ao facto de existir transferência de massa de LP para LC, traduzindo isso numa diminuição de velocidade. Este comportamento é bastante diferente do RU, onde as tensões aumentam para jusante da zona da

interface devido ao desenvolvimento da camada de mistura. No caso da subalimentação do LP, o desenvolvimento da camada de mistura é mais difícil de interpretar. De facto a elevada diferença inicial de velocidades entre leitos provoca elevadas tensões que, apesar do desenvolvimento da camada de mistura, não aumentam para jusante. Em vez disso diminuem consequência da transferência de massa que provoca uma diminuição do gradiente de velocidades. Comparando os resultados RNU -19% em X8000 (Figuras 6.12 e 6.13) com as correspondentes em RU (Figuras 5.13 e 5.14), pode constatar-se que os valores das tensões são superiores para o RNU pois no fundo do canal o RU ainda está longe de ser atingido, sendo por isso maior o gradiente de velocidades.

A energia cinética turbulenta aumenta no fundo do LP e na região da interface diminui como se pode observar na Figura 6.14. Tais alterações são consequência do aumento da produção de turbulência verificado no fundo do canal e da transferência de massa. Em relação à zona da interface (camada de mistura) a diminuição pode ser explicado pela existência de estruturas turbulentas (vórtices de eixo vertical).

A Figura 6.7 representa uma comparação da distribuição transversal das tensões de arrastamento sendo notório que os seus pontos máximos de tensão se situam na região da interface e respectiva camada de mistura. Em geral o modelo é capaz de simular as tensões de arrastamento pois os valores experimentais apresentam o mesmo comportamento transversal incluindo as inflexões verificadas, não sendo possível verificar se os valores máximos coincidem devido a uma falta de valores experimentais, já os valores mínimos são bem modelados.

Em relação ao nível de fiabilidade do modelo é visível um certo afastamento dos resultados numéricos e experimentais possivelmente resultante de um erro de calibração da rugosidade por parte de Teixeira (2011) que assumiu valores mais baixos do que são na realidade.

6.2.7 Avaliação do modelo

A presente simulação foi gerada através de um modelo do canal com 10 metros de comprimento que, como se previa não iria ter falhas na modelação de alturas de água, caudais e velocidades como ocorreu para a mesma simulação com o canal dividido em dois troços de 5 metros já descrito anteriormente no Capítulo 4.

Em relação à performance do modelo $k-\varepsilon$ foi evidente a sua boa reprodução de resultados de velocidades médias U . Já no que diz respeito aos fenómenos dos vórtices verticais e horizontais o modelo $k-\varepsilon$ não os consegue reproduzir fidedignamente apenas sendo possível obter uma ideia da sua existência.

Observando a Figura 6.8 onde se apresentam os resultados numéricos e experimentais de U em cada ponto, constata-se que os valores experimentais são, em geral, superiores aos numéricos. Uma explicação para esta diferença reside na condição de fronteira a jusante no modelo numérico, que poderá não corresponder exactamente à altura do regime uniforme

da simulação numérica.

Assim, os resultados indicam que a altura imposta a jusante no modelo, igual à medida experimentalmente, deveria ser ligeiramente menor fazendo com que as velocidades aumentassem.

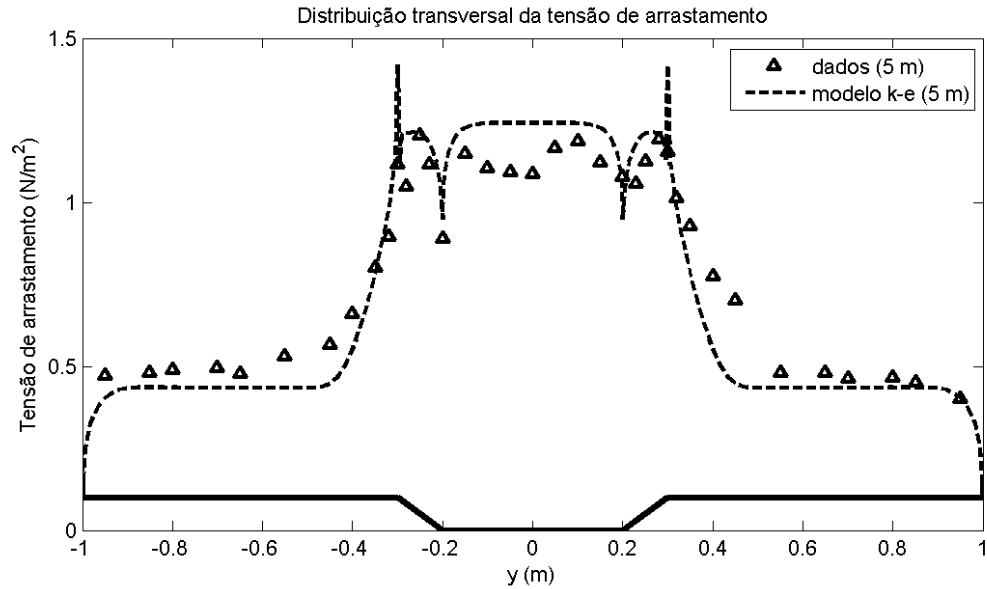


Figura 6.7: Distribuição transversal das tensões de arrastamento, dados experimentais e numéricos para RNU -19%

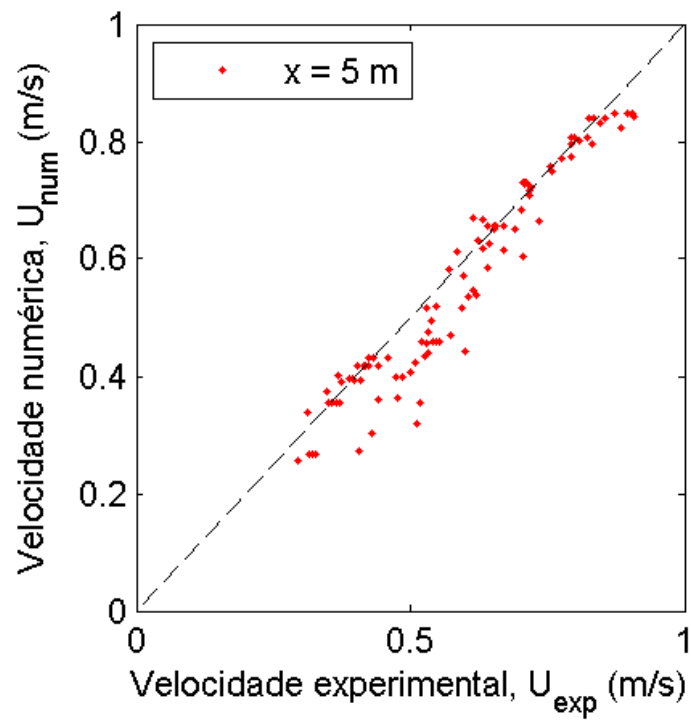
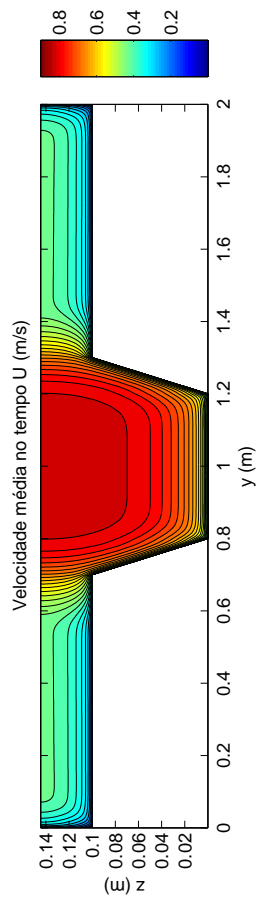
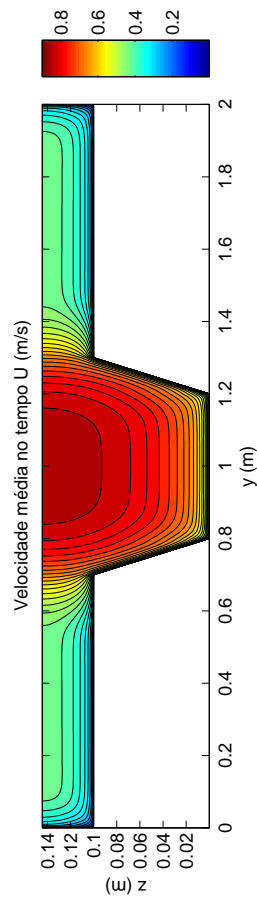


Figura 6.8: Performance do modelo numérico com modelo experimental para X5000 em RNU -19%

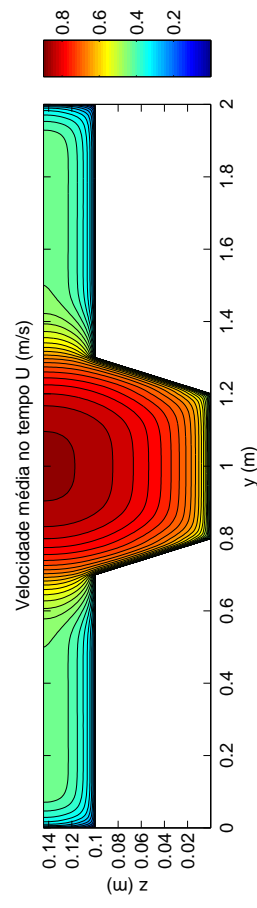


(a) Velocidades médias no tempo U para X3000



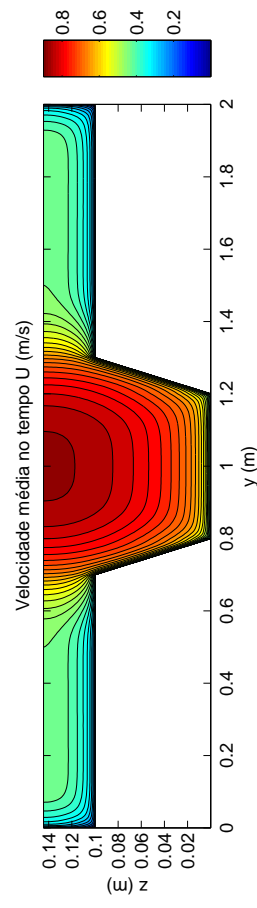
(b) Velocidades médias no tempo U para X4000

(c) Velocidades médias no tempo U para X5000



(d) Velocidades médias no tempo U para X6000

(e) Velocidades médias no tempo U para X7000



(f) Velocidades médias no tempo U para X8000

Figura 6.9: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos em RNU -19%

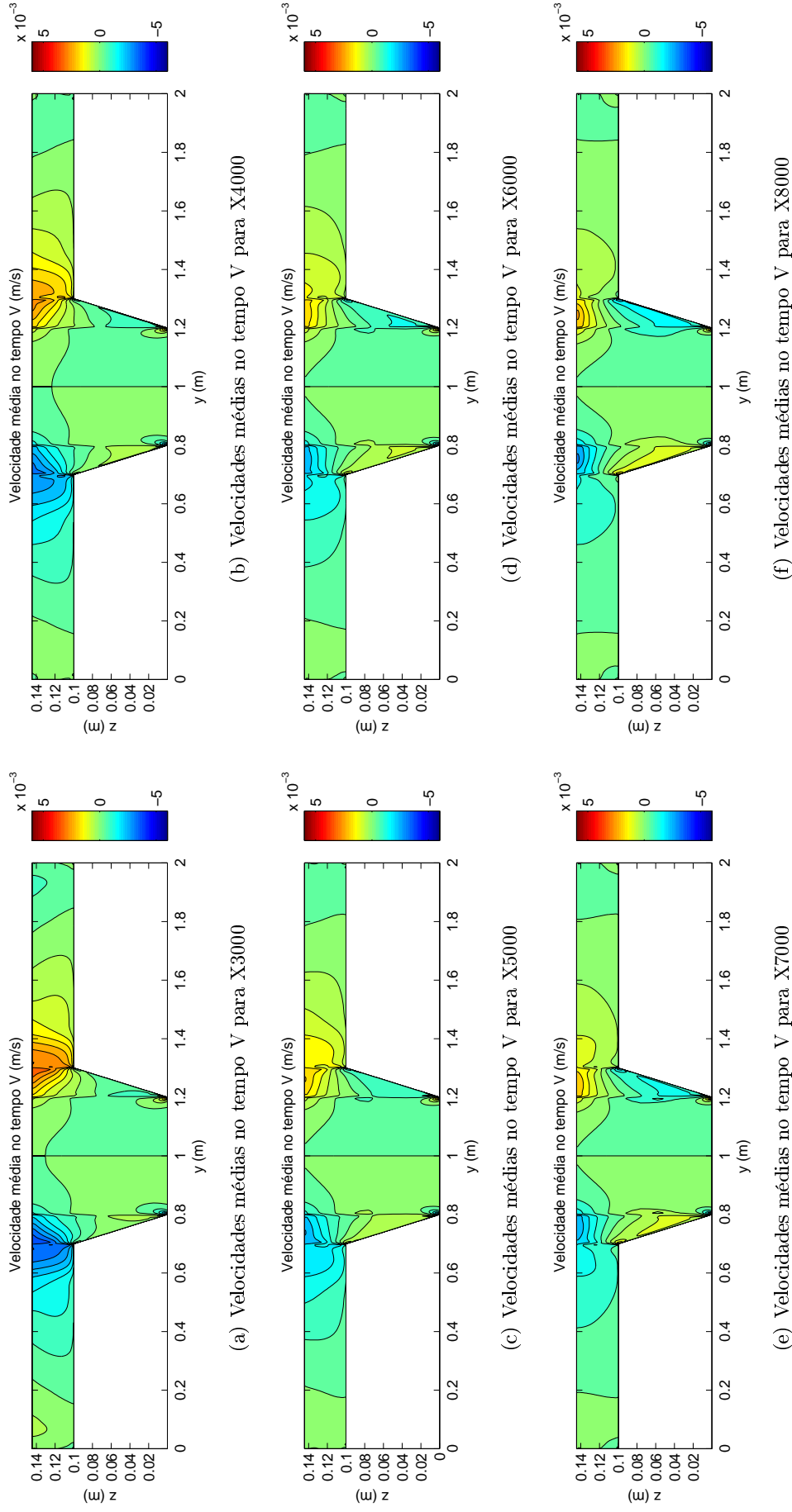


Figura 6.10: Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos em RNU -19%

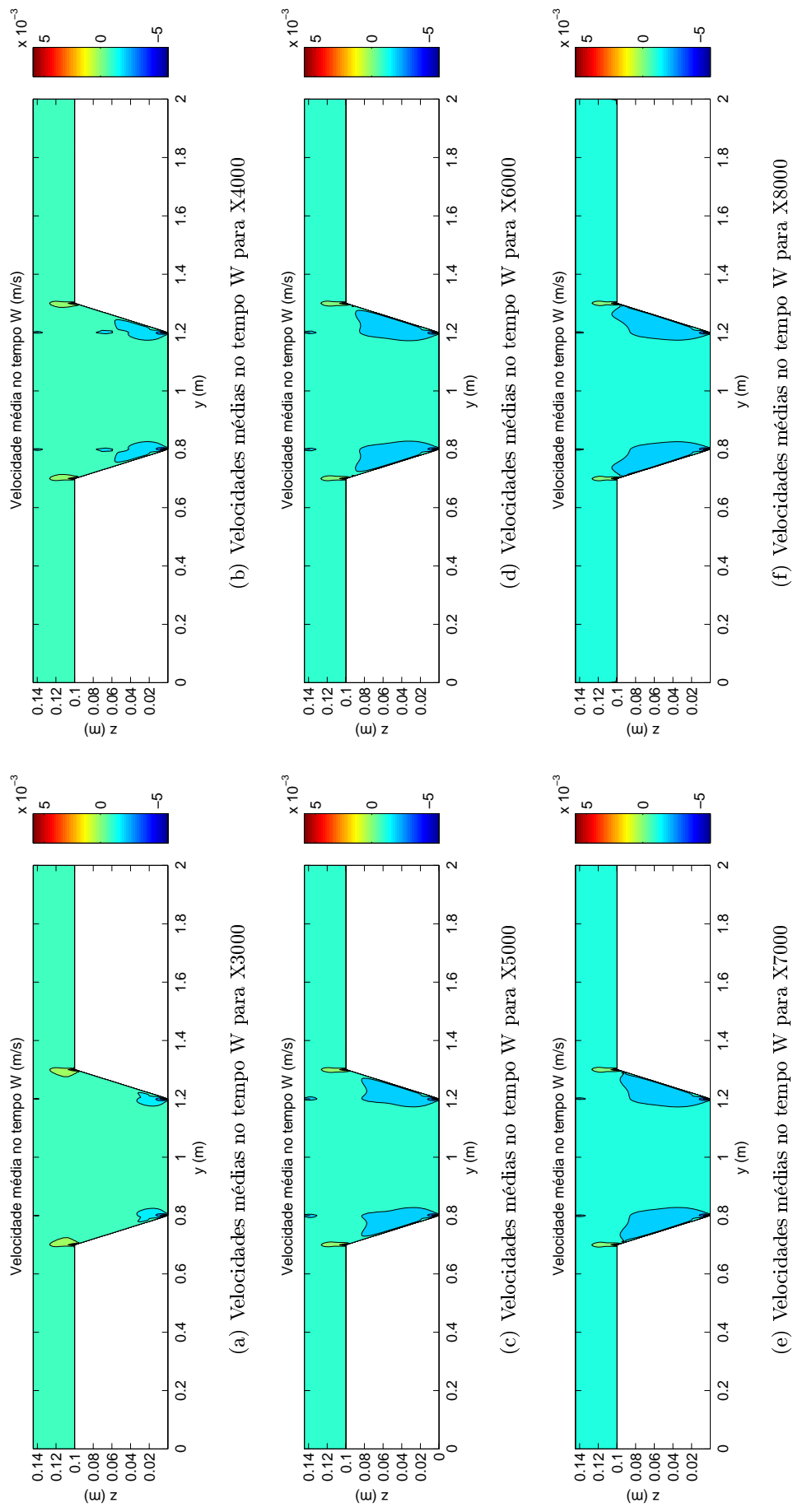


Figura 6.11: Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos em RNU -19%.

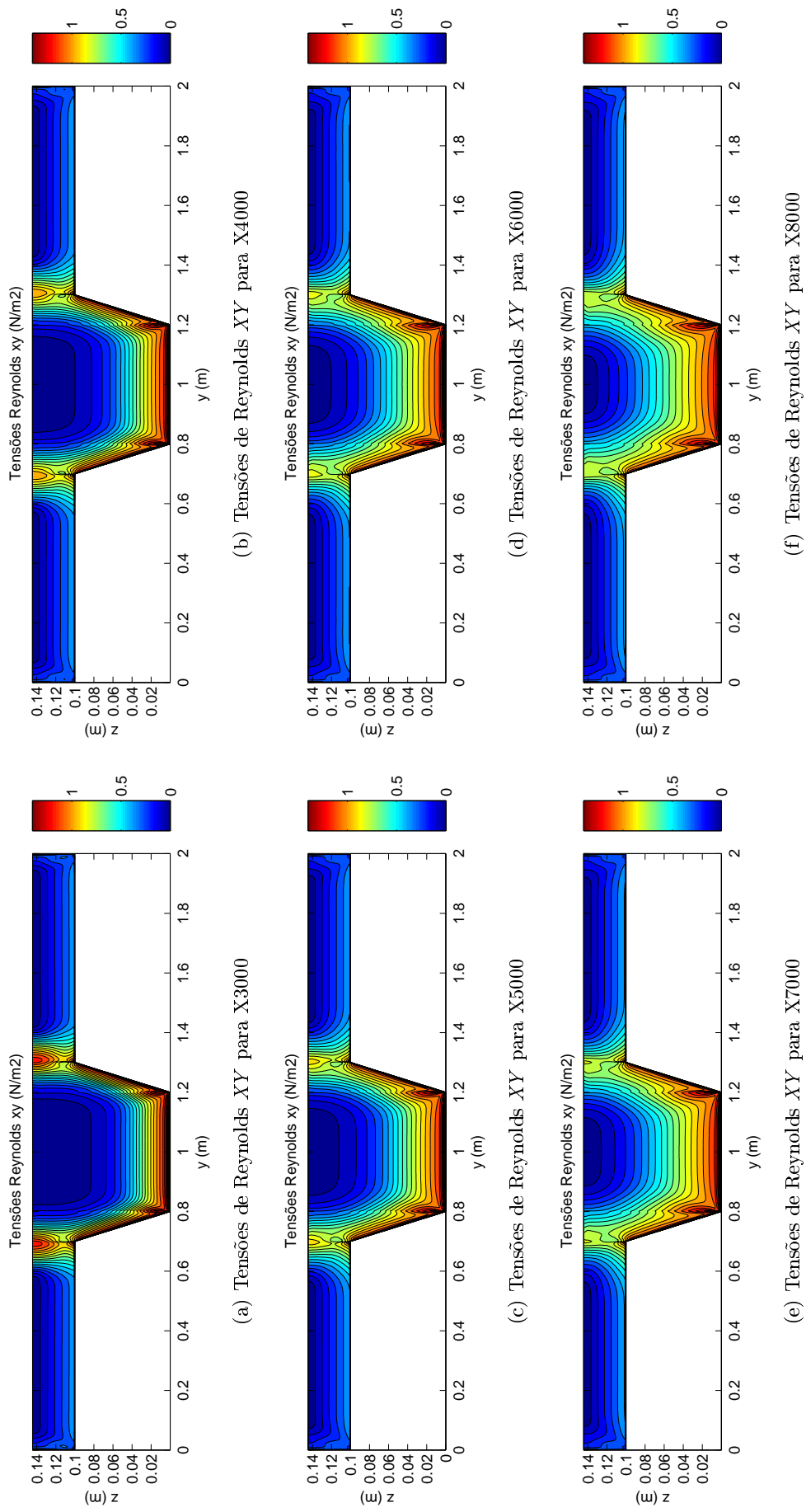


Figura 6.12: Tensões de Reynolds XY para RNU -19%

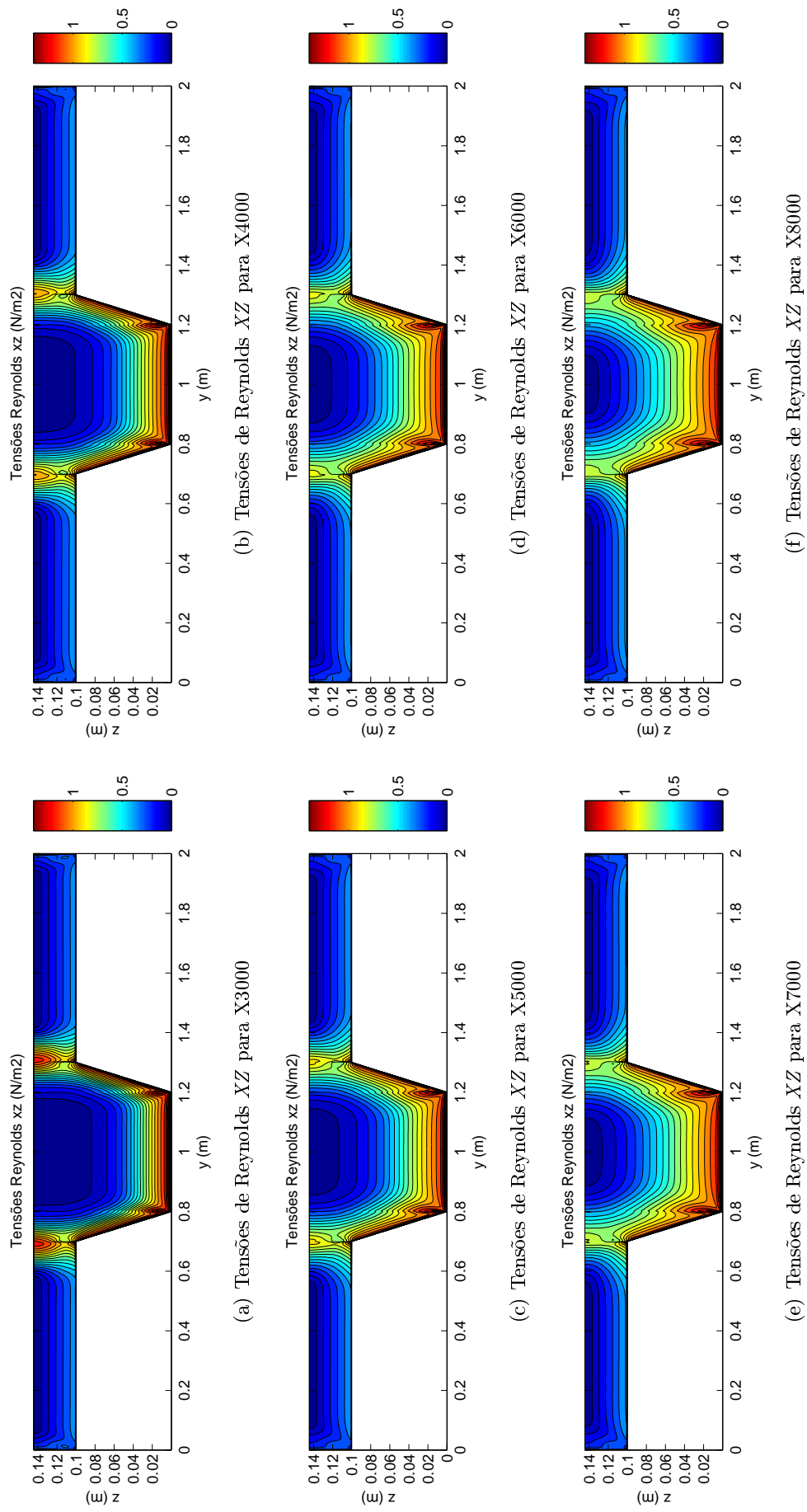
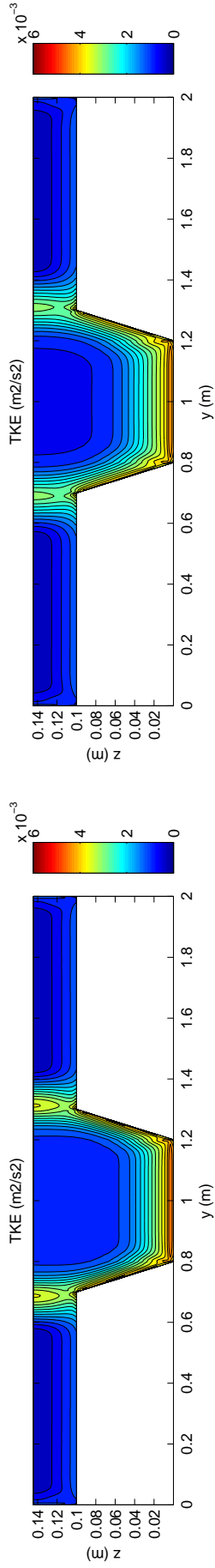
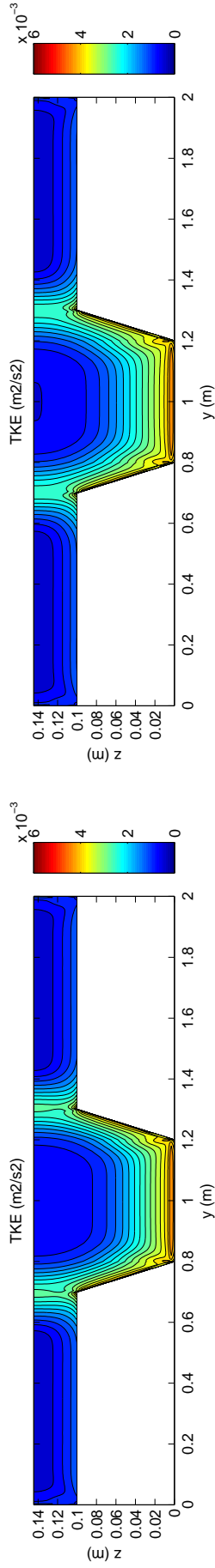


Figura 6.13: Tensões de Reynolds xz para RNU -19%

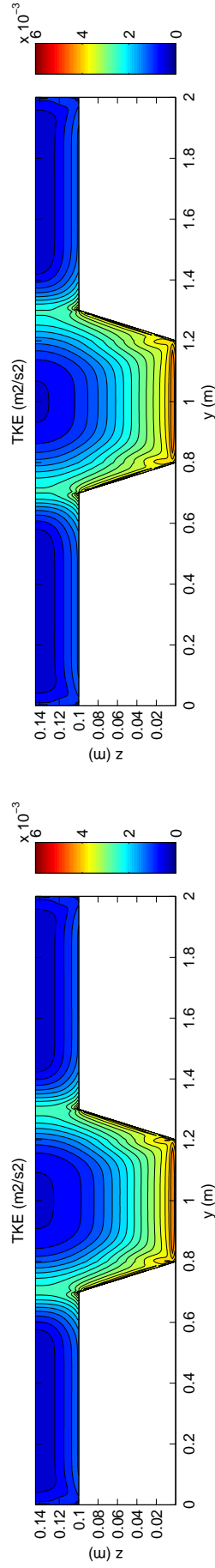


(a) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X3000



(b) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X4000

(c) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X5000



(d) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X6000

(e) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X7000

(f) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X8000

Figura 6.14: Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU -19%.

6.3 Resultados das simulações RNU +19%, +42% e +60%

6.3.1 Evolução de caudais

Observando as Figuras 6.15 a 6.23 é possível verificar que com as simulações obtiveram bons resultados muito semelhantes aos experimentais. Além disso correram conforme o previsto, diminuindo o caudal do LC, pois inicialmente foi imposta um aumento da sua velocidade face ao regime uniforme. Genericamente, pode-se concluir que o modelo $k-\varepsilon$ é capaz de simular correctamente a transferência de massa que ocorre dos LC para o LP devido à sobrealimentação inicial dos primeiros.

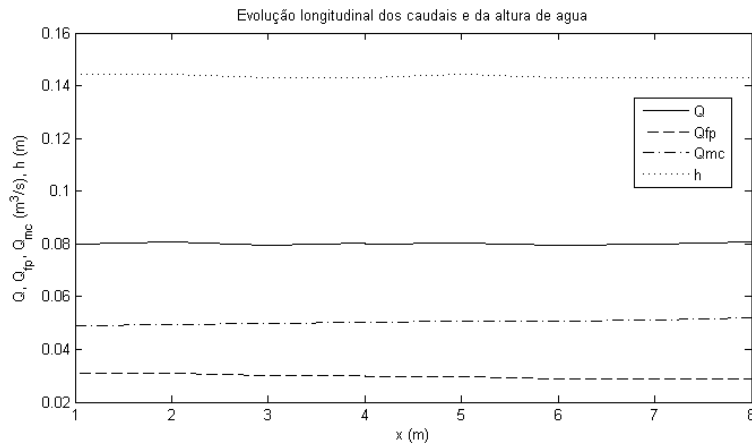


Figura 6.15: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU +19%

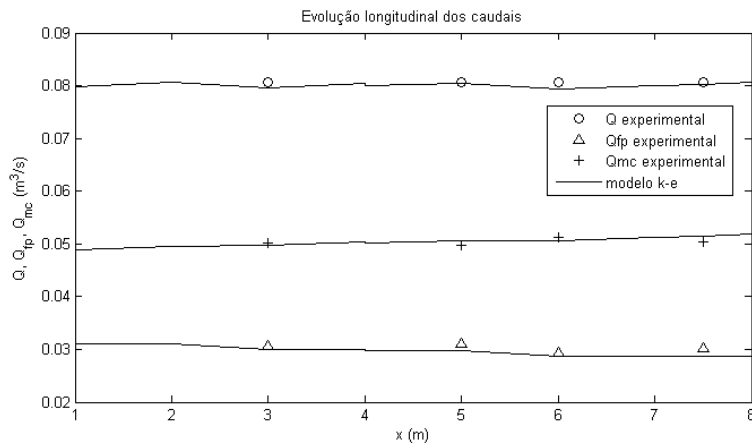


Figura 6.16: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +19%

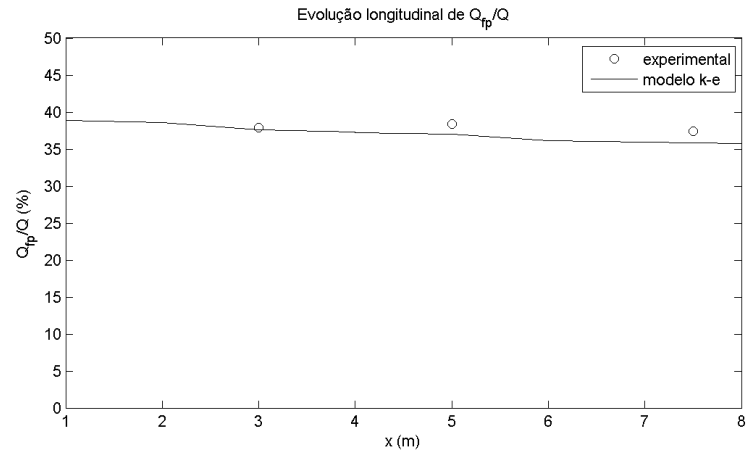


Figura 6.17: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para o leito de cheia em RNU +19%

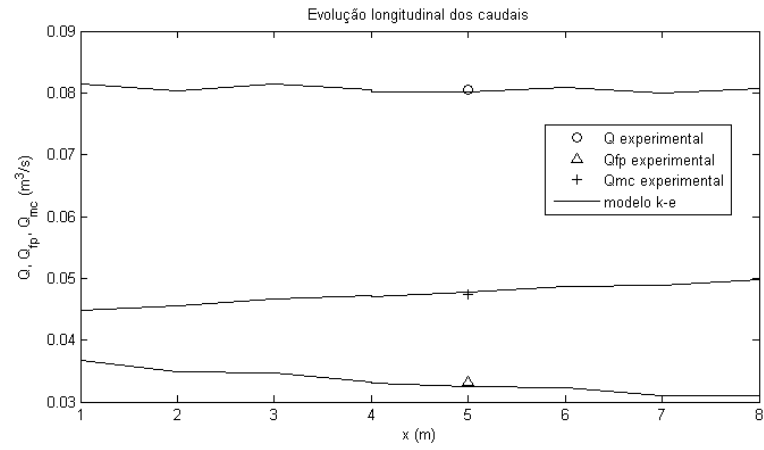


Figura 6.18: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU +42%

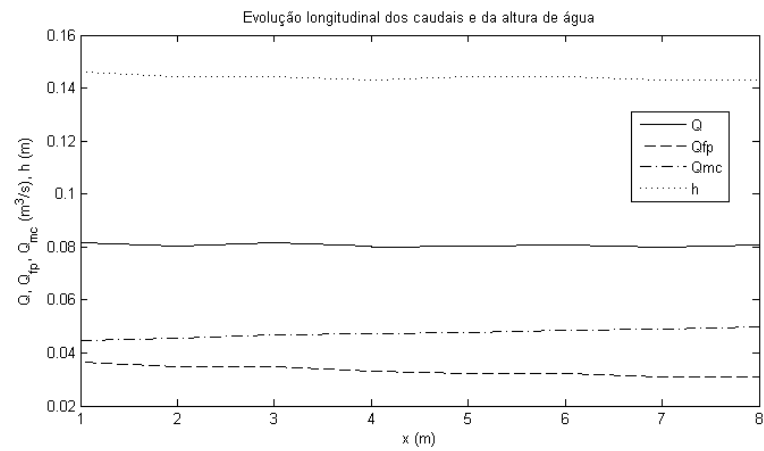


Figura 6.19: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +42%

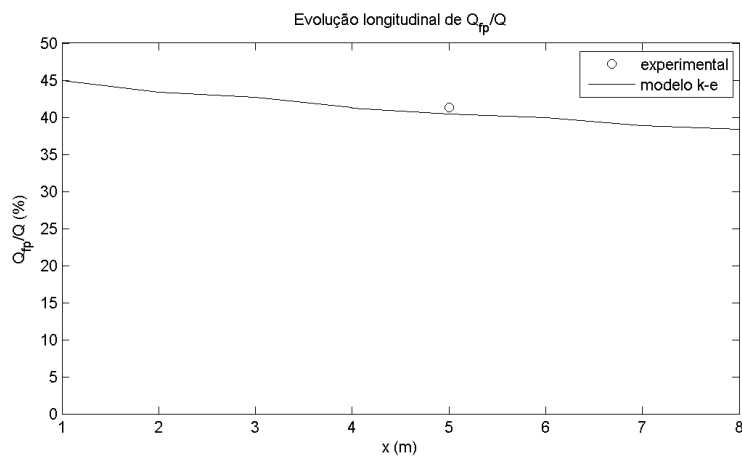


Figura 6.20: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para RNU +42%

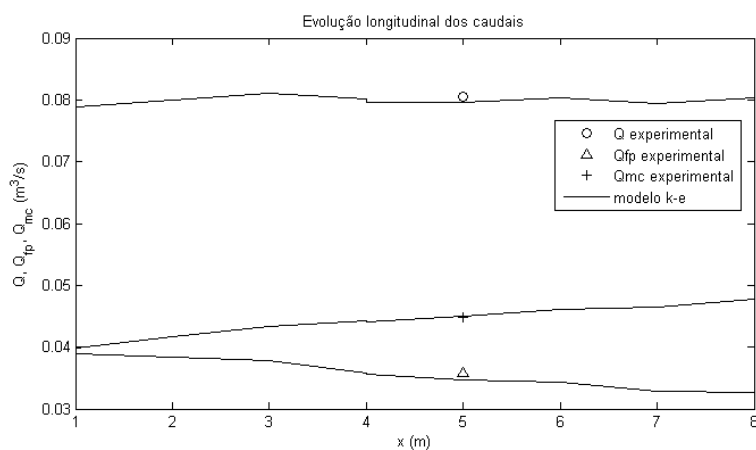


Figura 6.21: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ e da altura de água para RNU +60%

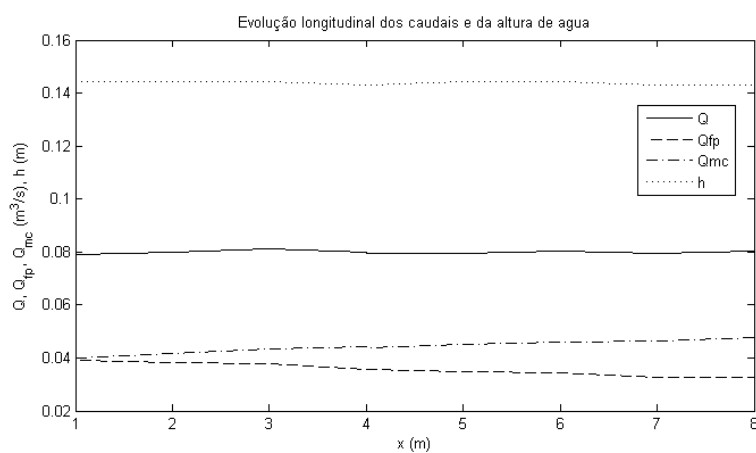


Figura 6.22: Evolução longitudinal dos caudais e da altura de água para RNU +60%

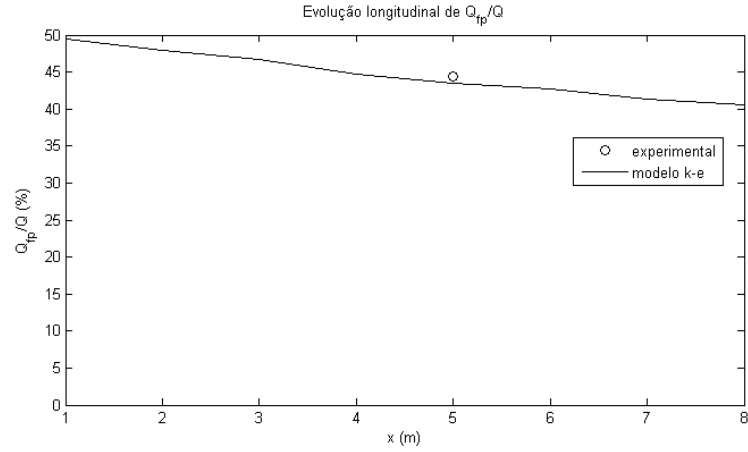


Figura 6.23: Comparação da evolução longitudinal dos caudais experimentais e do modelo $k-\varepsilon$ para RNU +60%

6.3.2 Desenvolvimento da camada limite

Nas Figuras 6.24 a 6.26 é possível observar a evolução dos perfis verticais ao longo do canal para as secções X3000, X5000, X6000 e X7500, o gráfico representa o desenvolvimento da camada limite.

Na Figura 6.24 para uma profundidade elevada até $Z=0.04$ m as velocidades na três secções são semelhantes, na Figura 6.25 para uma profundidade elevada até $Z=0.05$ m as velocidades são semelhantes e também para Figuras 6.26 para uma profundidade elevada até $Z=0.06$ m as velocidades são semelhantes, este fenómeno observado vai de encontro ao descrito por Massey (2002). Para as três figuras anteriormente referidas, a partir de $Z=0.07$ m começa-se a notar o desenvolvimento da camada limite com variações de velocidades, deixado de existir um perfil vertical passando para um perfil curvo, demonstrando assim a influência do fundo no desenvolvimento da camada limite nas respectivas simulações. Tais variações são possíveis de se ver em maior pormenor nas Figuras 6.34 a 6.36 onde se apresentam as isolinhas para as velocidades médias no tempo U .

Analisando em conjunto as Figuras 6.24 e 6.37, 6.25 e 6.38, 6.26 e 6.38, é possível verificar que as velocidades no LP e LC são superiores nos resultados experimentais.

Como se pode observar nas Figuras 6.34 a 6.36 ao longo das secções existe uma evolução notória nas isolinhas da velocidade, vão se afastando do fundo o que representa um aumento de velocidade. Este efeito é mais notório no LP, onde a altura de água é maior e, consequentemente a camada limite necessita de mais espaço para se desenvolver.

É também notório o aumento das velocidades no LP pois as presentes simulações consistiram em alterar as velocidades iniciais do LC, aumentando-a. O escoamento tende para RU como tal é natural que exista transferência de massa entre os LC e LP e consequente aumento da velocidade e caudal no LP e diminuição no LC, como se pode observar respectivamente nas Figuras 6.34 e 6.15, 6.35 e 6.18, 6.36 e 6.18.

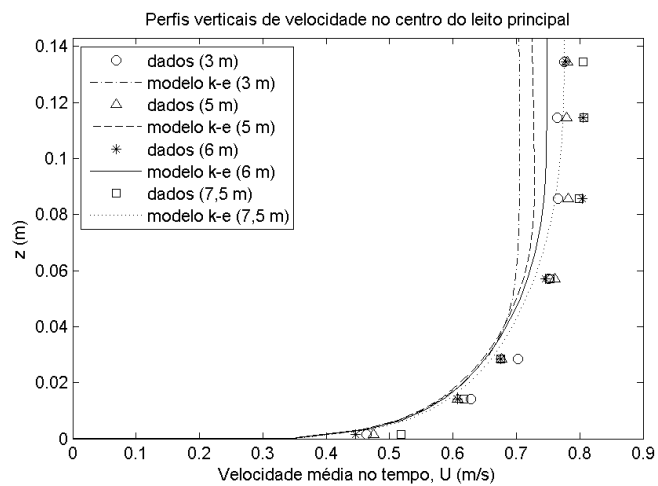


Figura 6.24: Perfis verticais de velocidades para RNU +19%

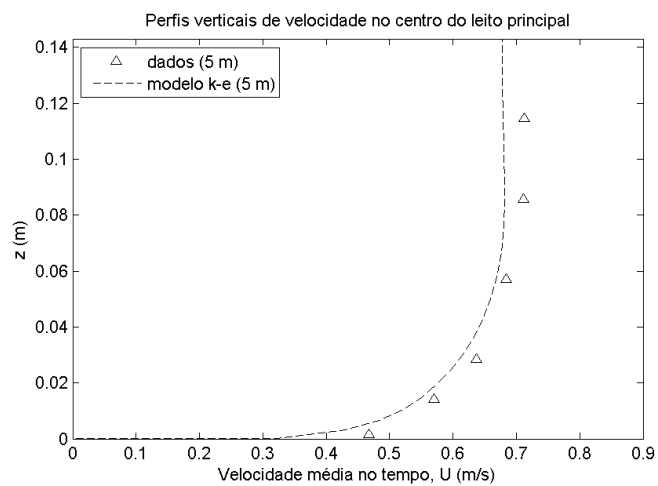


Figura 6.25: Perfis verticais de velocidades para RNU +42%

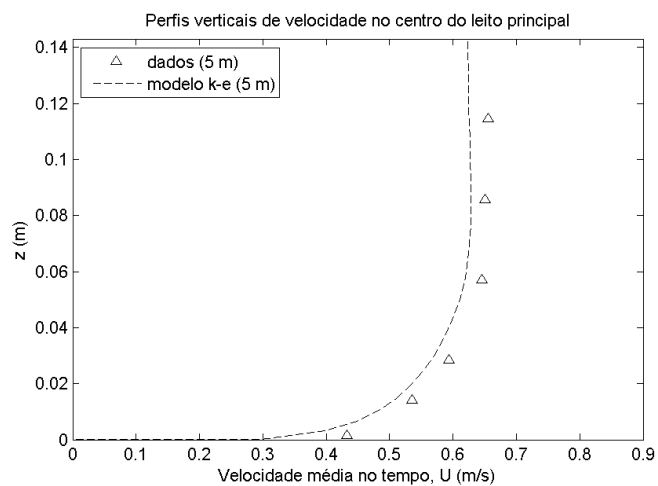


Figura 6.26: Perfis verticais de velocidades para RNU +60%

6.3.3 Comparação do modelo numérico com experimental

Na comparação das velocidades médias no tempo U entre os modelos numéricos e experimentais pode-se verificar que se situam na mesma ordem de grandeza, apesar de serem superiores no modelo experimental não só no fundo do LP mas também na região da interface e LC junto à superfície livre.

Analisando as Figuras 6.37 e 6.38 é possível verificar que nos resultados experimentais a camada de mistura é afectada pela transferência de massa do LC para o LP, empurrando os vórtices de eixo vertical para o LP. Nos resultados numéricos este efeito não é tão visível indicando que o modelo isotrópico $k-\varepsilon$ não reproduz com exactidão a turbulência gerada na camada de mistura.

Apesar das diferenças apresentadas anteriormente os resultados são, além da mesma ordem de grandeza, semelhantes. Reproduzem os mesmos fenómenos, para o LP diminuição de velocidade no fundo e aumento de velocidade junto à superfície livre, já no LC as velocidades vão diminuindo no fundo e junto à superfície livre. Como tal pode-se afirmar que a presente modelação e simulação produziu resultados fiáveis.

6.3.4 Desenvolvimento da camada de mistura

As velocidades longitudinais médias em profundidade, U_p representadas nas Figuras 6.27 a 6.29 demonstram a existência de uma camada de mistura para os modelos numéricos e experimentais. É possível verificar uma distribuição semelhante das velocidades médias numéricas e experimentais no LP, LC e interface.

Analisando o LP da Figura 6.27 é possível verificar uma evolução das velocidades médias ao longo do escoamento, facto esperado e já analisado. Como se pode observar nas Figuras 6.37 a 6.29 existe uma diminuição da camada de mistura, este fenómeno deve-se à transferência de massa que provoca uma diminuição dos gradientes de velocidade como se pode observar na Figura 2.5.

Genericamente, pode-se concluir que o modelo $k-\varepsilon$ reproduz com algum rigor os dados experimentais referentes à distribuição transversal da velocidade média em profundidade.

Contrariamente ao que acontece para a subalimentação (-19%), a camada de mistura não se expande muito na direcção dos LC, pelo que o modelo reproduz melhor a mesma. Refira-se que no caso da sobrealimentação, a transferência de massa ocorre dos LC para o LP, mas isso não provoca uma expansão significativa da camada de mistura no sentido do LP. Tal deve-se ao facto do crescimento de vórtices de eixo vertical no sentido do LP ser bloqueado pela velocidades elevadas do escoamento principal.

6.3.5 Correntes secundárias

O fenómeno das correntes secundárias é praticamente inexistente na presente simulação como se pode observar nas Figuras 6.39 a 6.44 existe uma evolução das isolinhas de V e W mas numa escala muito reduzida sendo a escala máxima das isolinhas cerca de 0.005 m/s, estes resultados vão de encontro às limitações do modelo $k-\varepsilon$. De facto, tratando-se de um modelo de turbulência isotrópico é previsível que não consiga reproduzir as correntes secundárias que são geradas pela anisotropia da turbulência nas fronteiras sólidas.

Ainda assim, comparativamente ao RU e RNU (-19%), verifica-se que a transferência de massa dos LC para o LP (Figuras 6.39 a 6.41) provoca a existência de movimento vertical descendente na zona da interface (Figuras 6.42 a 6.44). Este movimento parece confirmar a hipótese de que a massa transferida dos LC para LP não consegue penetrar facilmente no escoamento principal, mergulhando em profundidade.

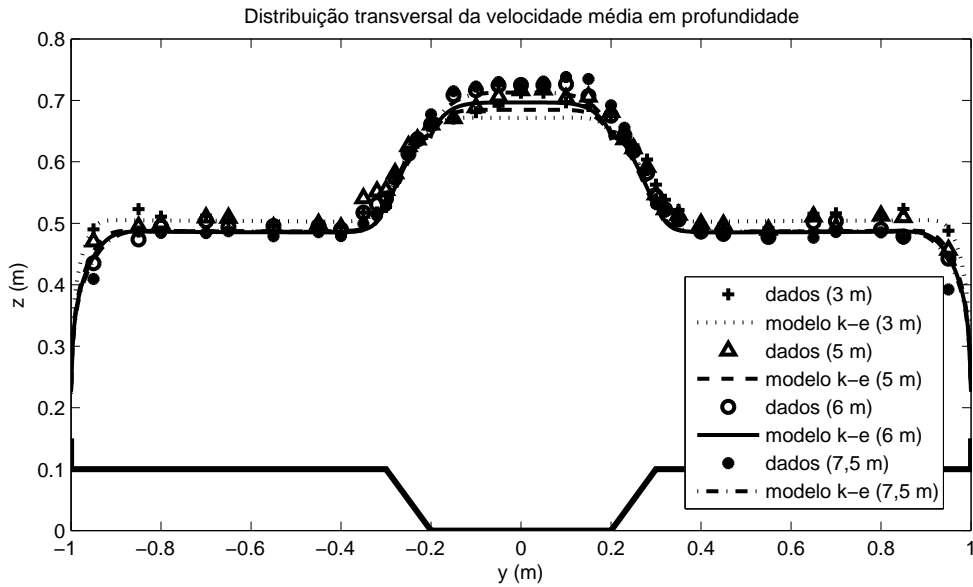


Figura 6.27: Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU +19%

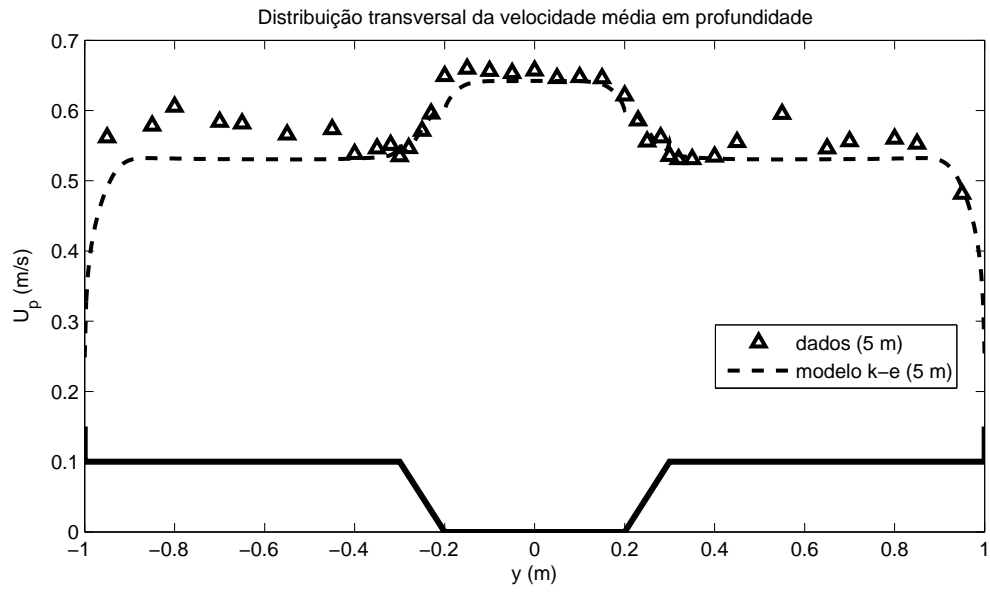


Figura 6.28: Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU+42%

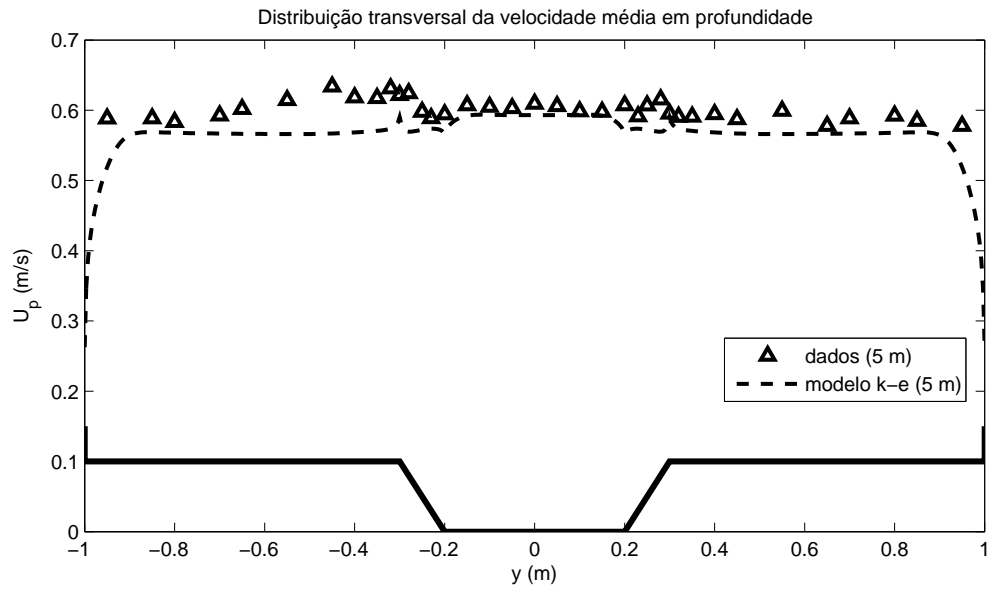


Figura 6.29: Distribuição transversal da velocidade média em profundidade U_p , dados experimentais e numéricos para RNU+60%

6.3.6 Análise da estrutura turbulenta

Para a análise da estrutura turbulenta foram tidas em conta:

- Tensões de Reynolds XY
- Tensões de Reynolds XZ
- Energia cinética turbulenta (TKE)

Como não existem dados experimentais para proceder a uma comparação e melhor avaliação terá de ser feita uma análise exclusiva do ensaio numérico.

Como se pode observar nas Figuras 6.45 a 6.50, tal como aconteceu para RU, regista-se um aumento das tensões ao longo do canal junto ao fundo do LP e na região da interface, essa diminuição deve-se ao facto de existir transferência de massa de LC para LP, traduzindo isso numa diminuição de velocidade.

Refira-se que o comparativamente com o RU, o aumento de tensões na interface é bastante retardado nas situações com sobrealimentação inicial dos LC. Isto significa que apesar da transferência de massa ser bastante intensa nos primeiros metros do canal (Figuras 6.17, 6.20 e 6.23), aumentando o gradiente lateral das velocidades, a resposta da camada de mistura a esse aumento de gradiente parece ser relativamente demorada. Este facto confirma os resultados de Bousmar *et al.* (2005) e Fernandes *et al.* (2011) que apontam para a necessidade de ter canais muito longos para permitir o desenvolvimento completo do escoamento no caso de se impor uma sobrealimentação inicial dos LC.

A energia cinética turbulenta aumenta no fundo do LP, LC e na região da interface como se pode observar nas Figuras 6.51, 6.52 e 6.53 tais alterações são consequência do aumento da produção de turbulência verificado no fundo do canal. Em relação à zona da interface (camada de mistura) o aumento pode ser explicado pela existência de estruturas turbulentas (vórtices de eixo vertical).

6.3.7 Avaliação do modelo

As presentes simulações foram geradas através de um modelo de dois troços de 5 metros já descrito anteriormente no Capítulo 4.

Em relação à performance do modelo $k-\varepsilon$ foi evidente a produção de bons resultados de velocidades médias U , anteriormente comparadas com as experimentais. Já no que diz respeito aos fenómenos dos vórtices verticais e horizontais o modelo $k-\varepsilon$ não os consegue reproduzir fidedignamente apenas é possível obter uma ideia da sua existência.

Observando as Figuras 6.30, 6.31 e 6.32 onde se apresentam os resultados numéricos e experimentais de U em cada ponto, constata-se que os valores experimentais são, em geral, superiores aos numéricos tal como no RU e RNU (-19%). Uma explicação para esta

diferença reside na condição de fronteira a jusante no modelo numérico, que poderá não corresponder exactamente à altura do regime uniforme da simulação numérica.

Segundo Fernandes *et al.* (2011) e Bousmar *et al.* (2005) os modelos com um comprimento relativamente curto, como é o caso deste, apenas 10 metros, não são capazes de modelar a correctamente a turbulência. Pois, apesar da transferência de massa se realizar relativamente rápido os fenómenos de turbulência demoram mais tempo. Naden *et al.* (2006) simularam ensaios no *Flood Channel Facility* (FCF), canal com 60 metros de comprimento, conseguindo resultados fiáveis para os fenómenos da turbulência.

6.4 Discussão sobre o efeito da transferência de massa

Os dados numéricos obtidos, apesar de estarem limitados pelas hipóteses simplificativas do modelo $k-\varepsilon$ (e.g. turbulência isotrópica), permitem tecer algumas considerações acerca do efeito da transferência de massa.

Na Figura 6.33 apresenta-se a evolução do caudal dos LC ao longo do canal para RU e RNU -19%, +19%, +42% e +60%. Na figura constata-se que todos os regimes não uniformes tendem para o regime uniforme, o que é conseguido através da transferência de massa ao longo do canal. Verifica-se ainda que mesmo para os casos em que o desequilíbrio a montante não era elevando (-19% e +19%), o comprimento do canal é insuficiente para que o RU seja atingido. Esta conclusão vai de encontro aos resultados de Bousmar *et al.* (2005) e Fernandes *et al.* (2011).

Para avaliar o efeito da transferência de massa na turbulência da camada de mistura é interessante analisar os escoamentos diferentes em que o gradiente lateral de velocidades seja semelhante. Observando a Figura 6.33 podem identificar-se algumas situações em que isso acontece, nomeadamente a secção X6000 do RNU +42% e secção X8000 do RNU +60%. Nestas duas secções o caudal dos LC é igual e por isso o gradiente de velocidades deverá ser também semelhante. Mas, analisando as Figuras 6.35 (d) e 6.36 (f) é possível verificar que apesar do caudal dos LC ser igual para as duas secções, as velocidades no LP são diferentes. Nas tensões de Reynolds XY e XZ também se notam diferenças nas secções X6000 do RNU +42% e X8000 do RNU +60%, como se pode observar respectivamente nas Figuras 6.46 (d) e 6.47 (f), 6.49 (d) e 6.50 (f). Esta diferença de resultados é apoiada pelos resultados de Bousmar *et al.* (2005) e Fernandes *et al.* (2011).

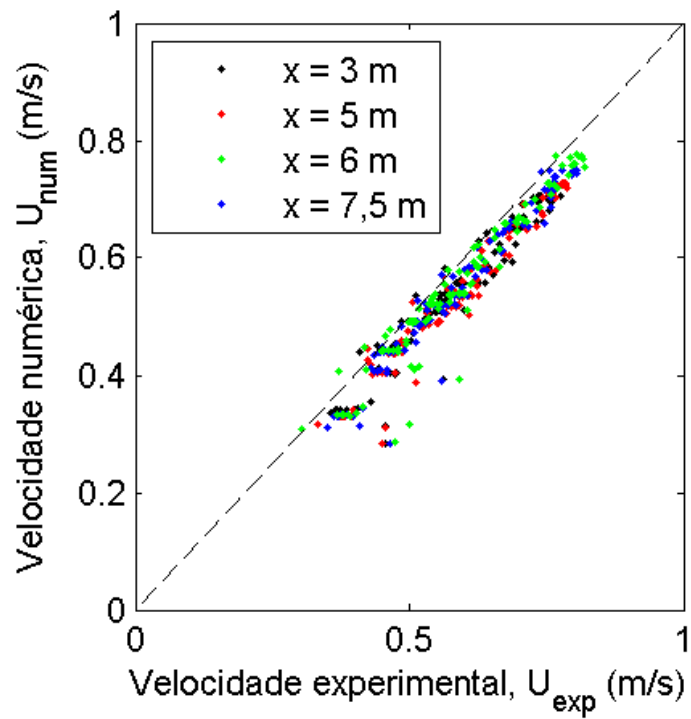


Figura 6.30: Performance do modelo numérico com modelo experimental para X3000, X5000, X6000 e X7500 em RNU +19%

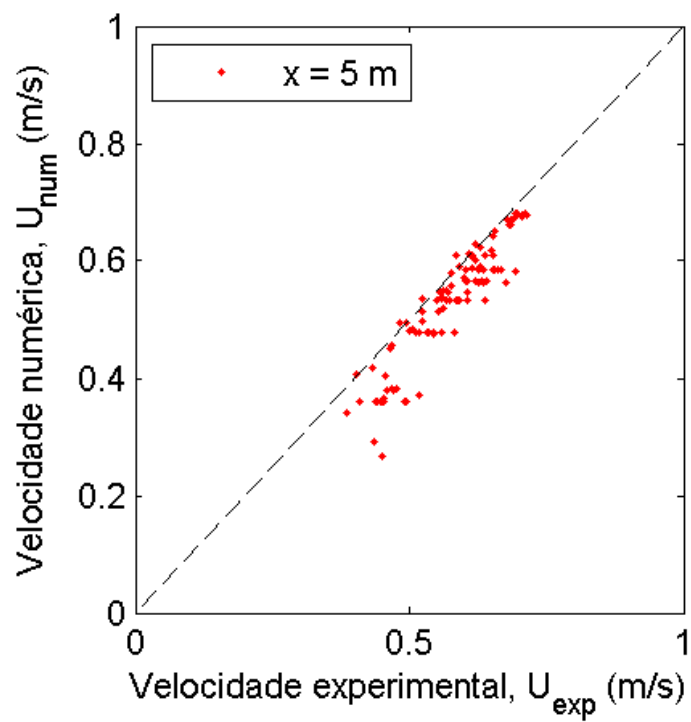


Figura 6.31: Performance do modelo numérico com modelo experimental para X5000 para RNU +42%

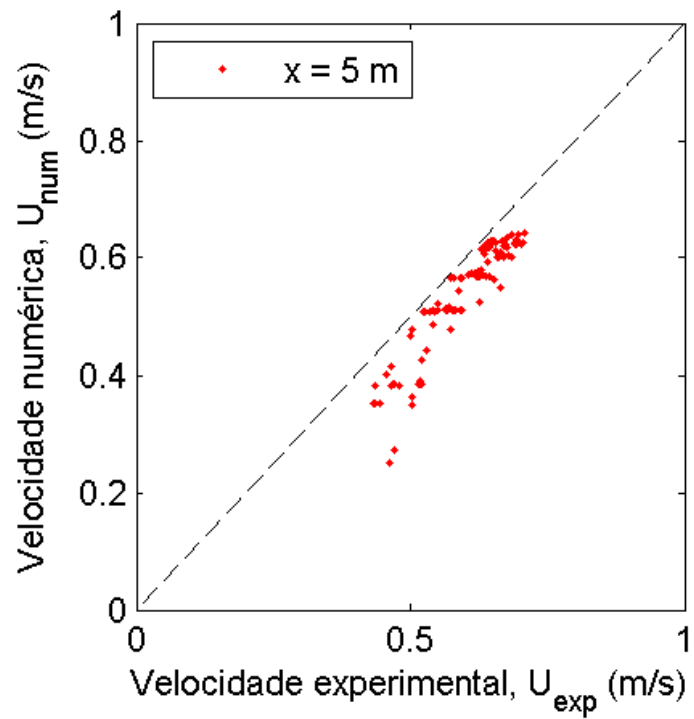


Figura 6.32: Performance do modelo numérico com modelo experimental para X5000 para RNU +60%

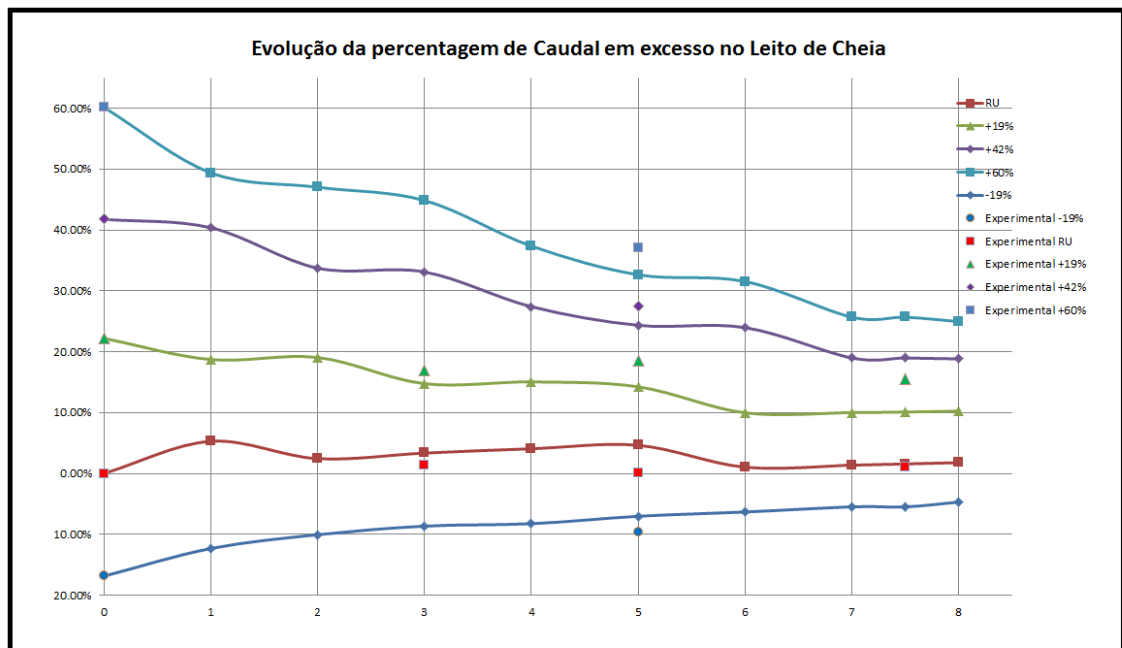


Figura 6.33: Evolução das simulações ao longo do canal.

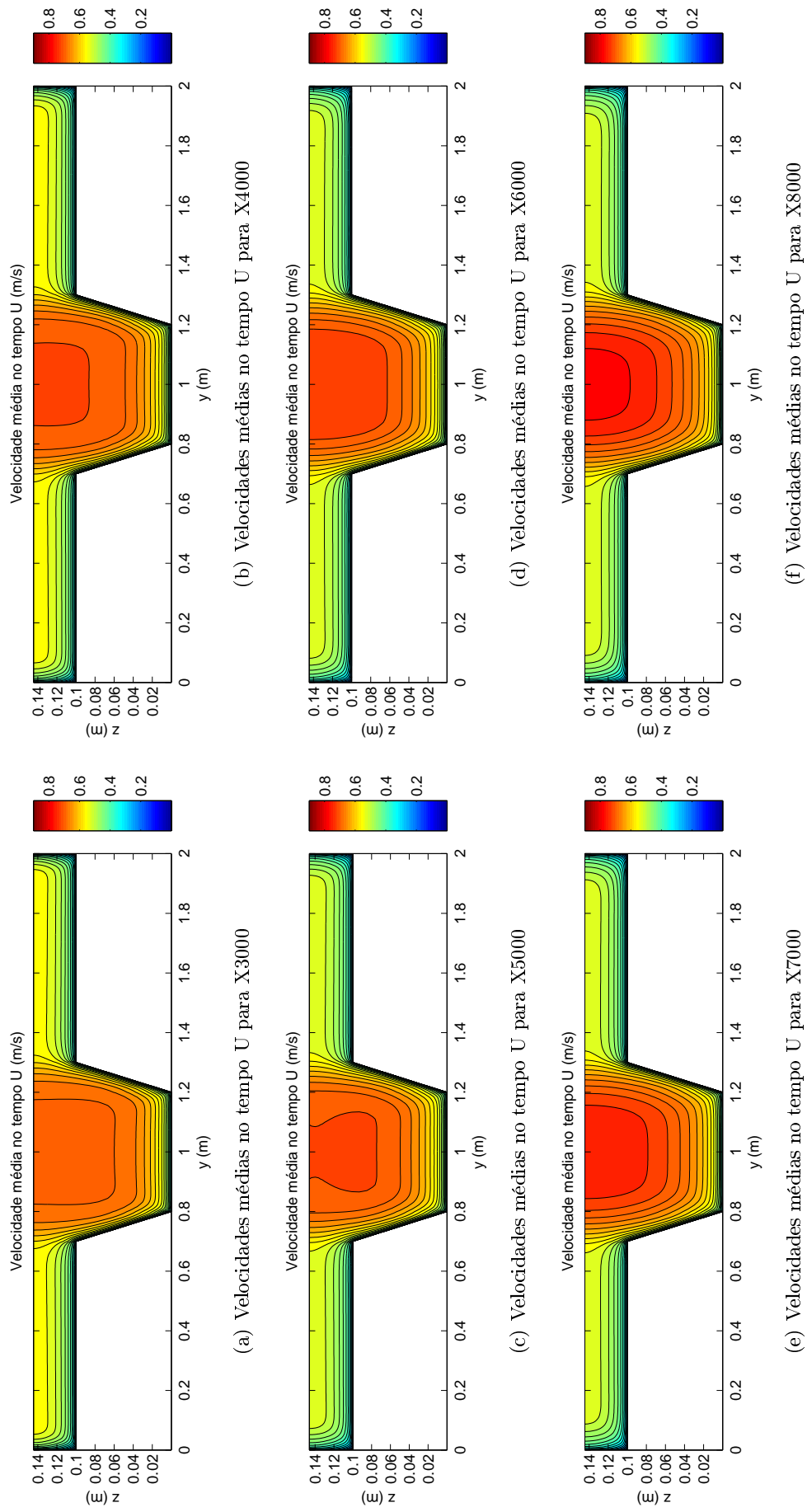


Figura 6.34: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos em RNU +19%.

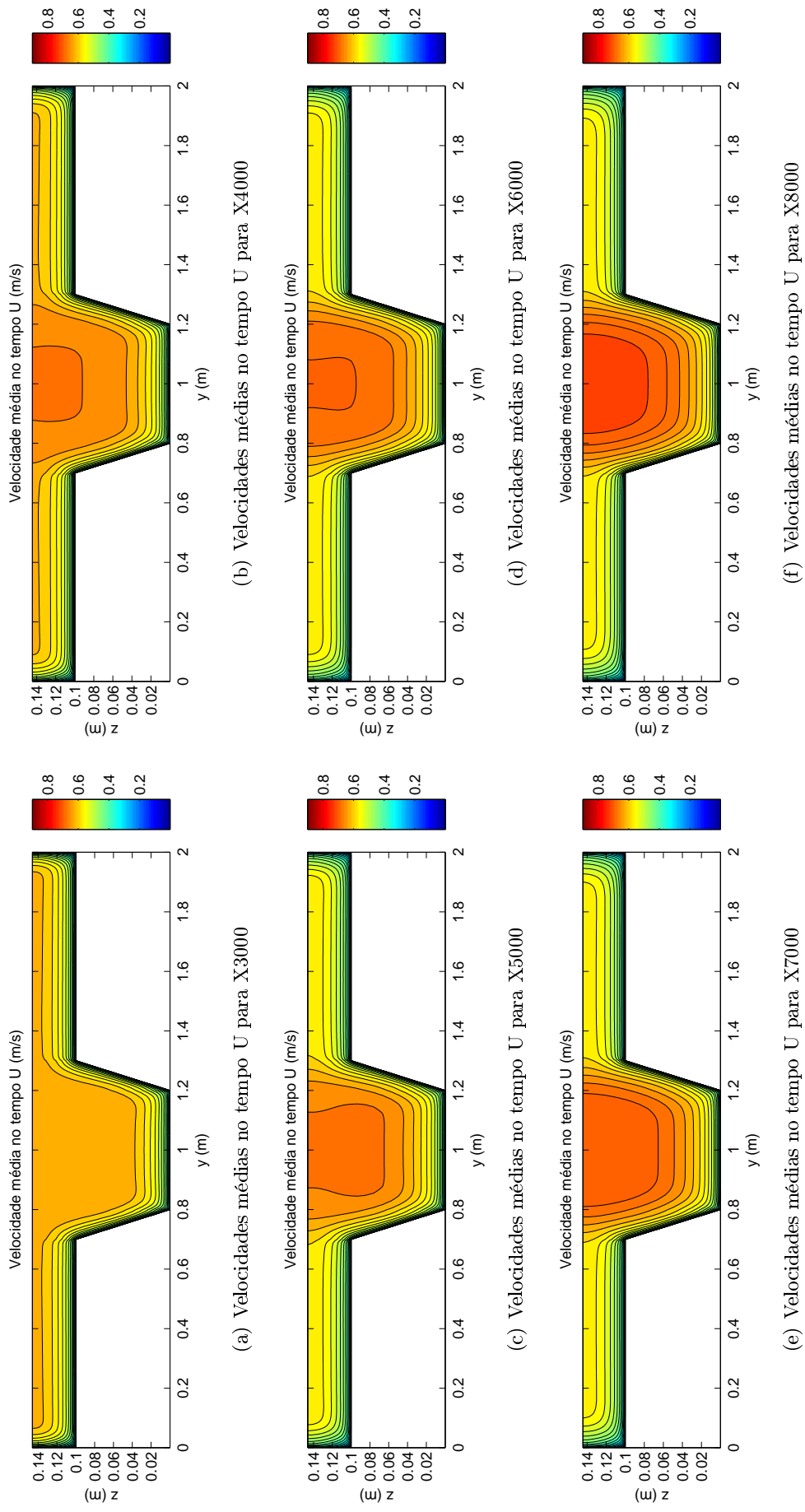
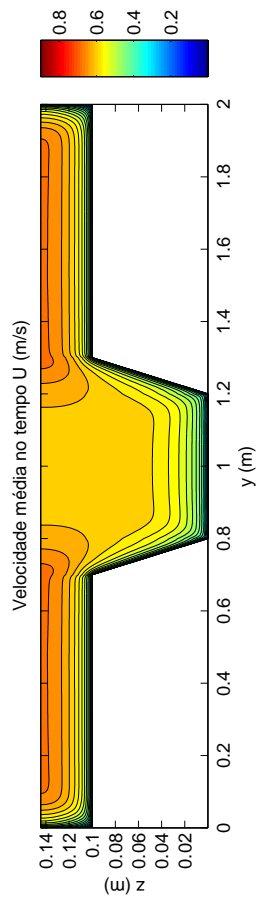
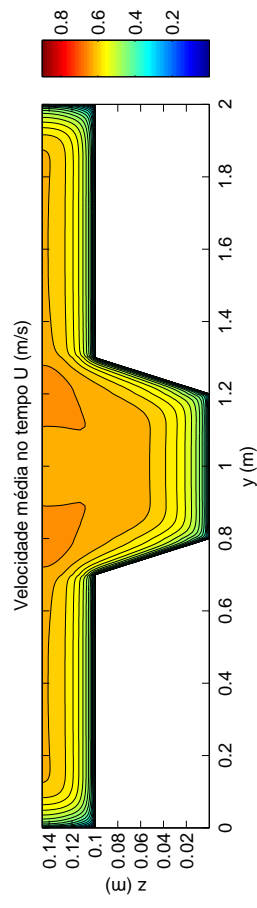


Figura 6.35: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos para RNU +42%

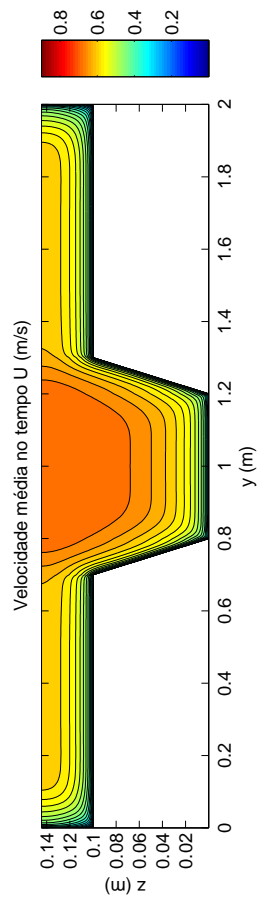


(a) Velocidades médias no tempo U para X3000



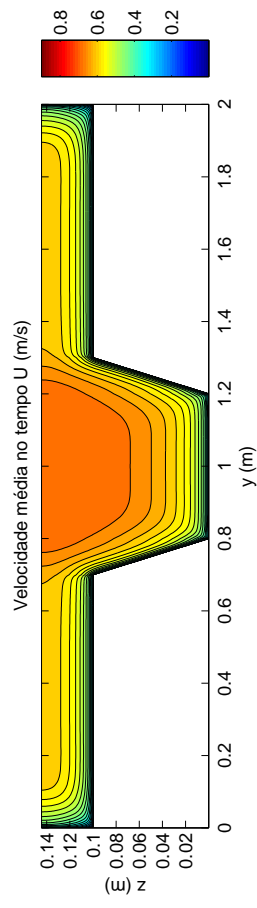
(b) Velocidades médias no tempo U para X4000

(c) Velocidades médias no tempo U para X5000



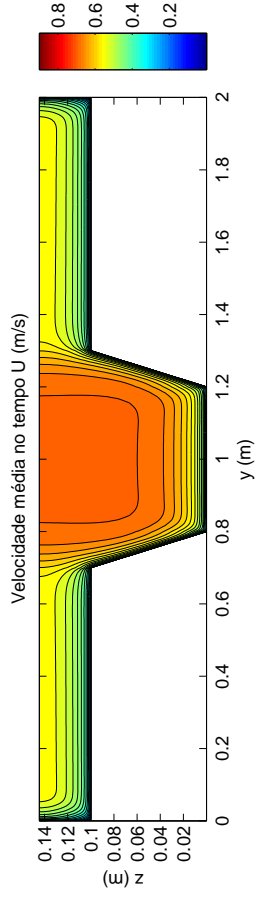
(d) Velocidades médias no tempo U para X6000

(e) Velocidades médias no tempo U para X7000

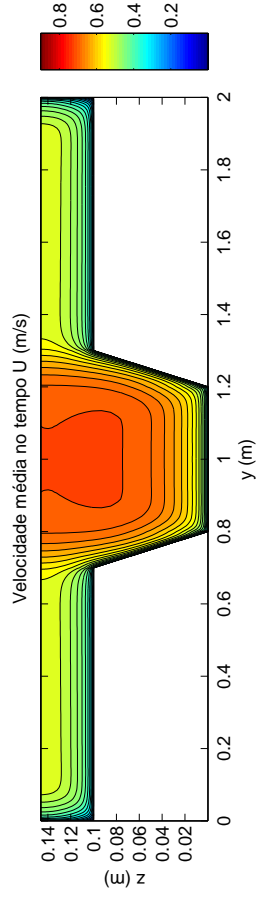


(f) Velocidades médias no tempo U para X8000

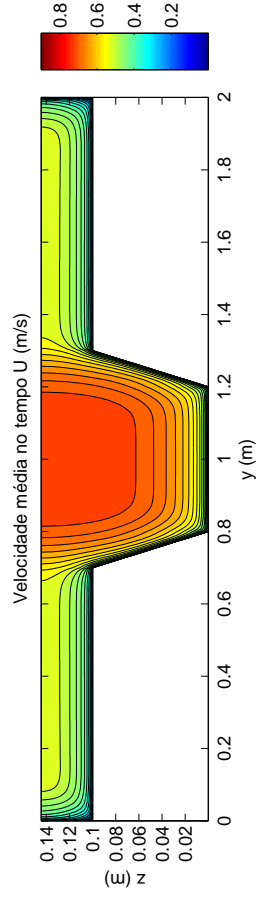
Figura 6.36: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos para RNU +60%.



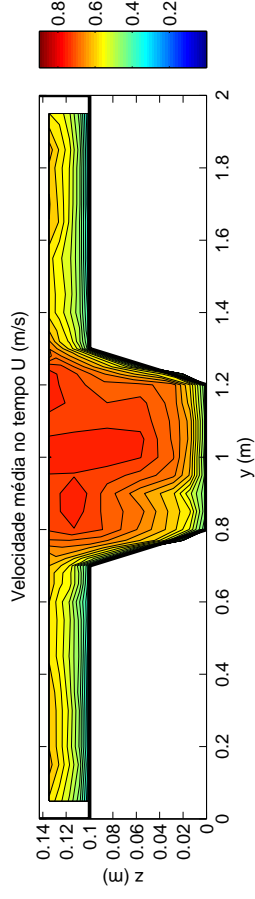
(a) Velocidades médias no tempo U do modelo numérico no tempo para X3000



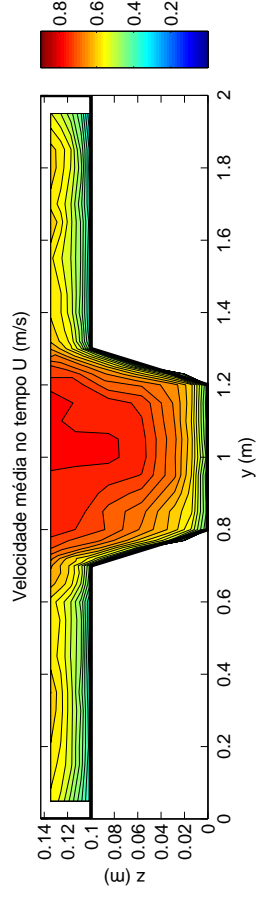
(c) Velocidades médias no tempo U do modelo numérico no tempo para X5000



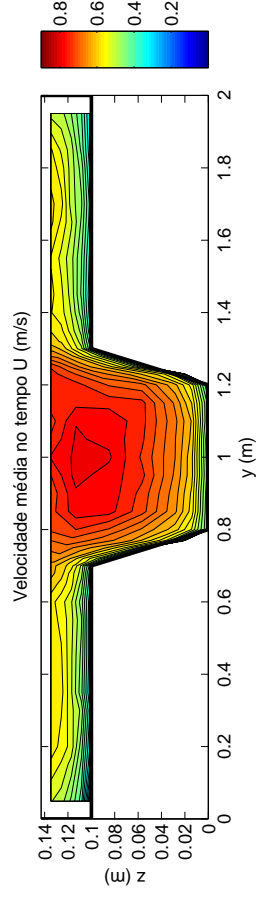
(e) Velocidades médias no tempo U do modelo numérico no tempo para X6000



(b) Velocidades médias no tempo U do modelo experimental no tempo para X3000

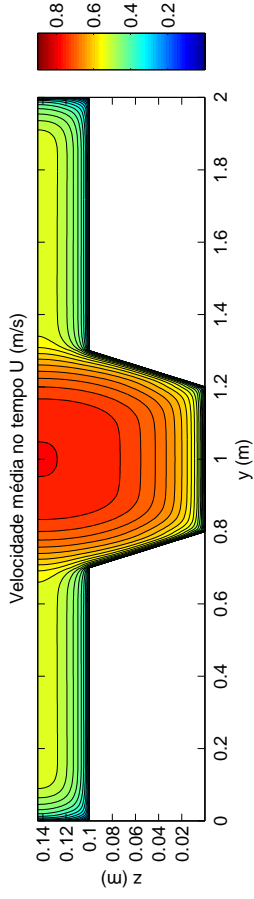


(d) Velocidades médias no tempo U do modelo experimental no tempo para X5000

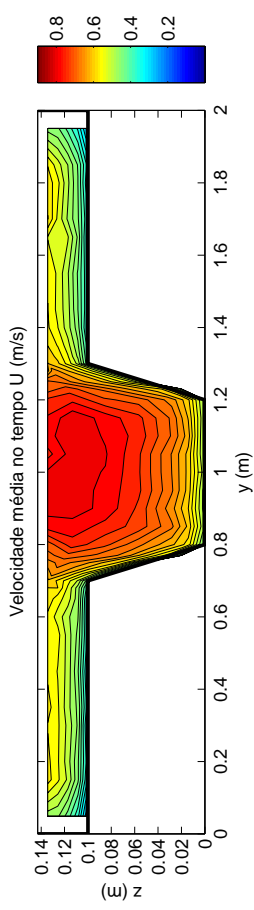


(f) Velocidades médias no tempo U do modelo experimental no tempo para X6000

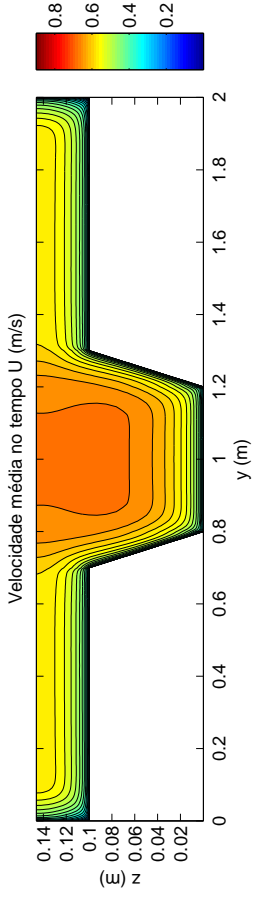
Figura 6.37: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais na posição X5000 em $RNU + 19\%$



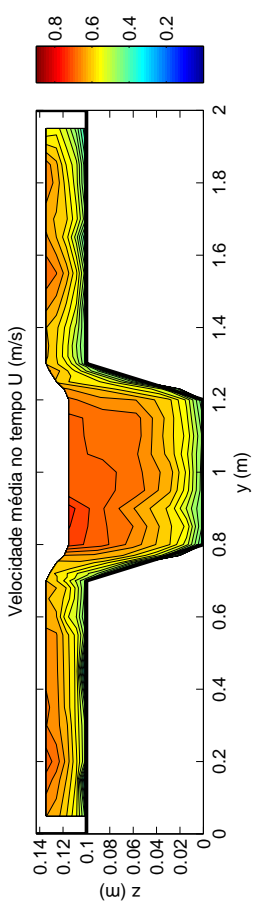
(a) Velocidades médias no tempo U do modelo numérico (+19%) no tempo para X7500



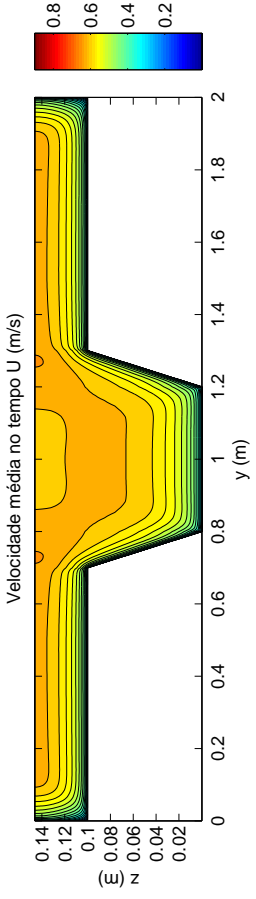
(b) Velocidades médias no tempo U do modelo experimental (+19%) no tempo para X7500



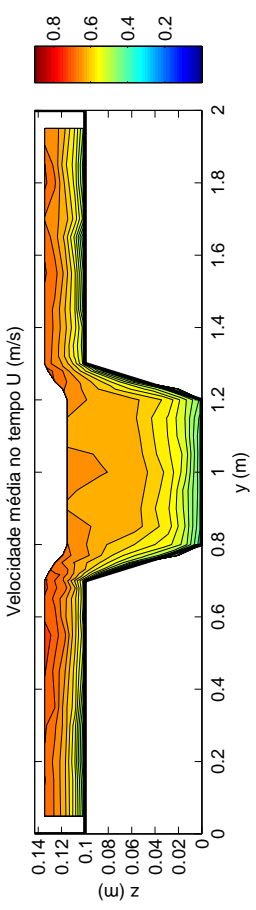
(c) Velocidades médias no tempo U do modelo numérico (+42%) no tempo para X5000



(d) Velocidades médias no tempo U do modelo experimental (+42%) no tempo para X5000

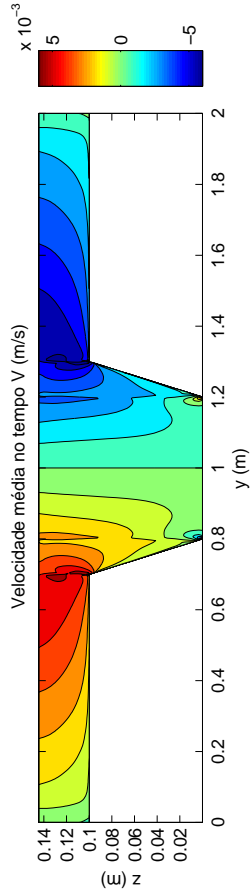


(e) Velocidades médias no tempo U do modelo numérico (+60%) no tempo para X5000

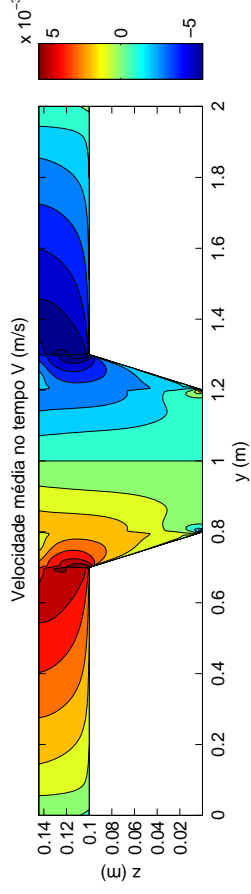


(f) Velocidades médias no tempo U do modelo experimental (+60%) no tempo para X5000

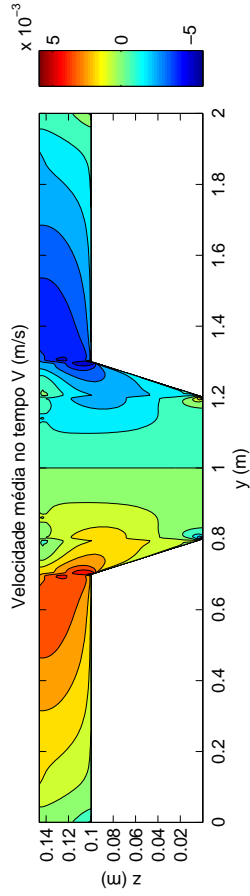
Figura 6.38: Isolinhas das velocidades médias no tempo U para os modelos numéricos e experimentais RNU +19%, +42%e +60%



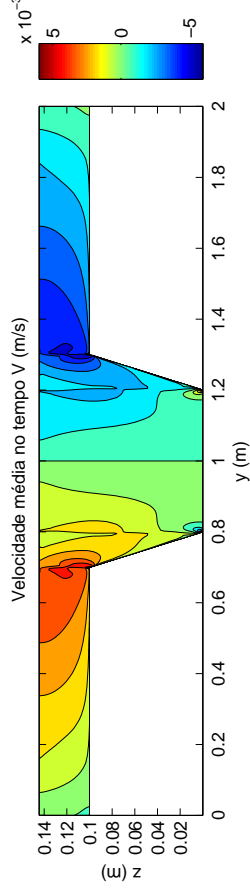
(a) Velocidades médias no tempo V para X3000



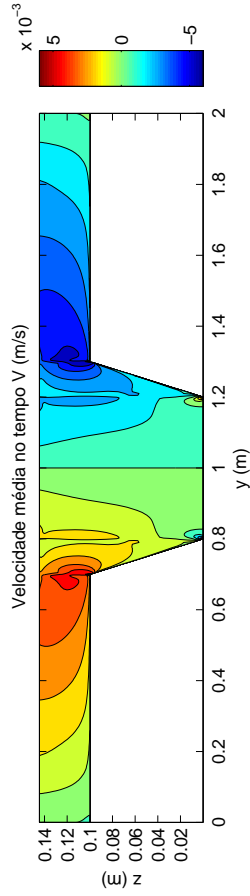
(b) Velocidades médias no tempo V para X4000



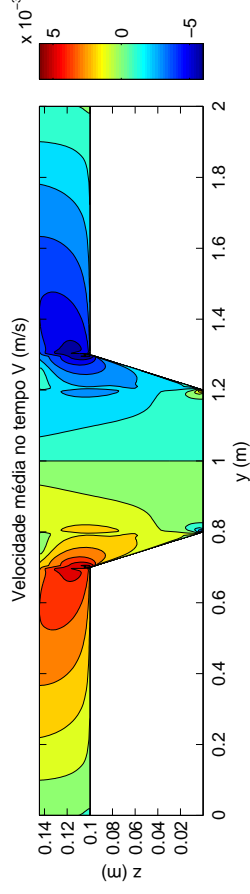
(c) Velocidades médias no tempo V para X5000



(d) Velocidades médias no tempo V para X6000



(e) Velocidades médias no tempo V para X7000



(f) Velocidades médias no tempo V para X8000

Figura 6.39: Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos em RNU +19%

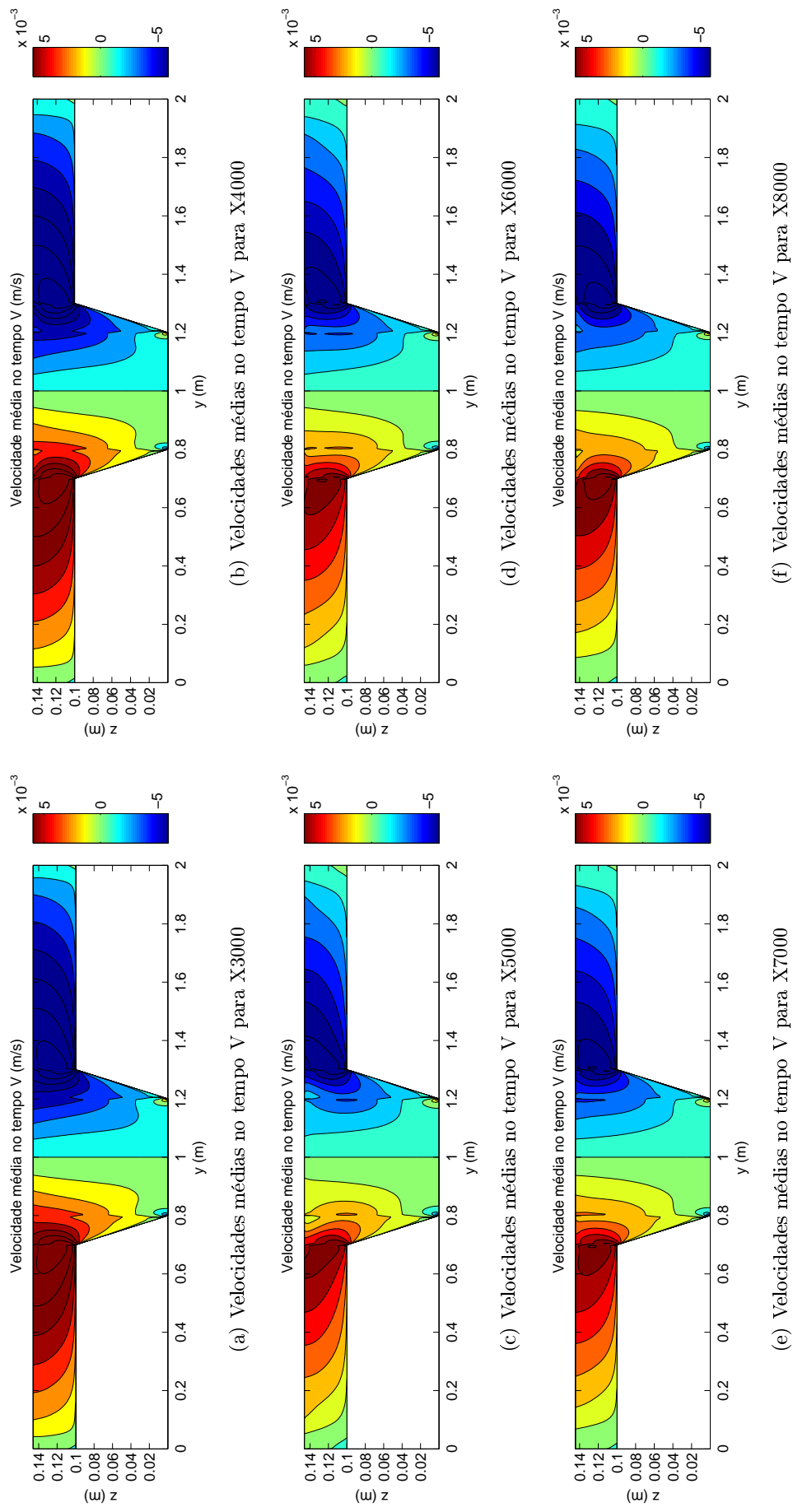


Figura 6.40: Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos para $RNU + 42\%$.

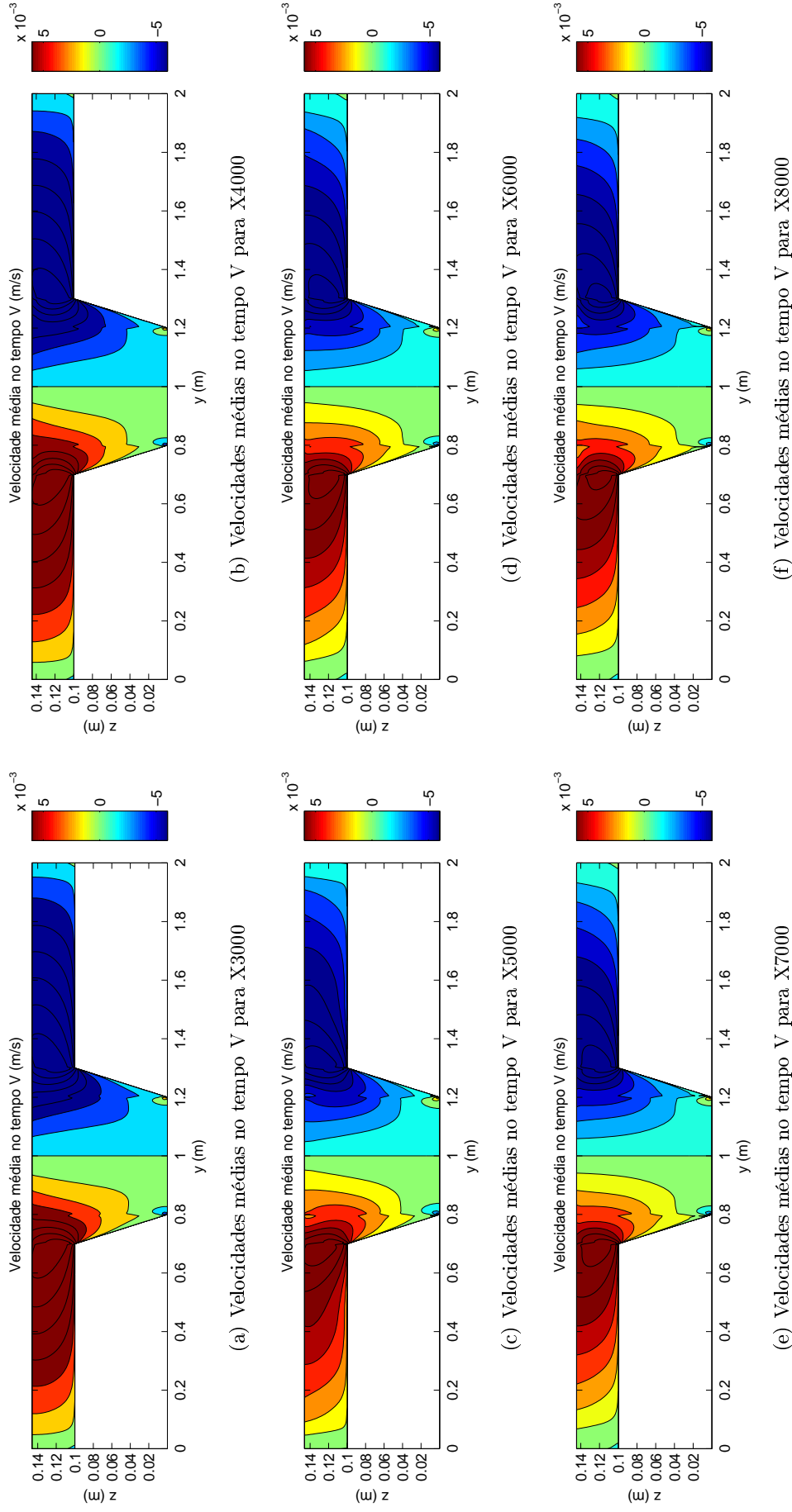


Figura 6.41: Isolinhas das velocidades médias no tempo V para os modelos numéricos para $RNU + 60\%$

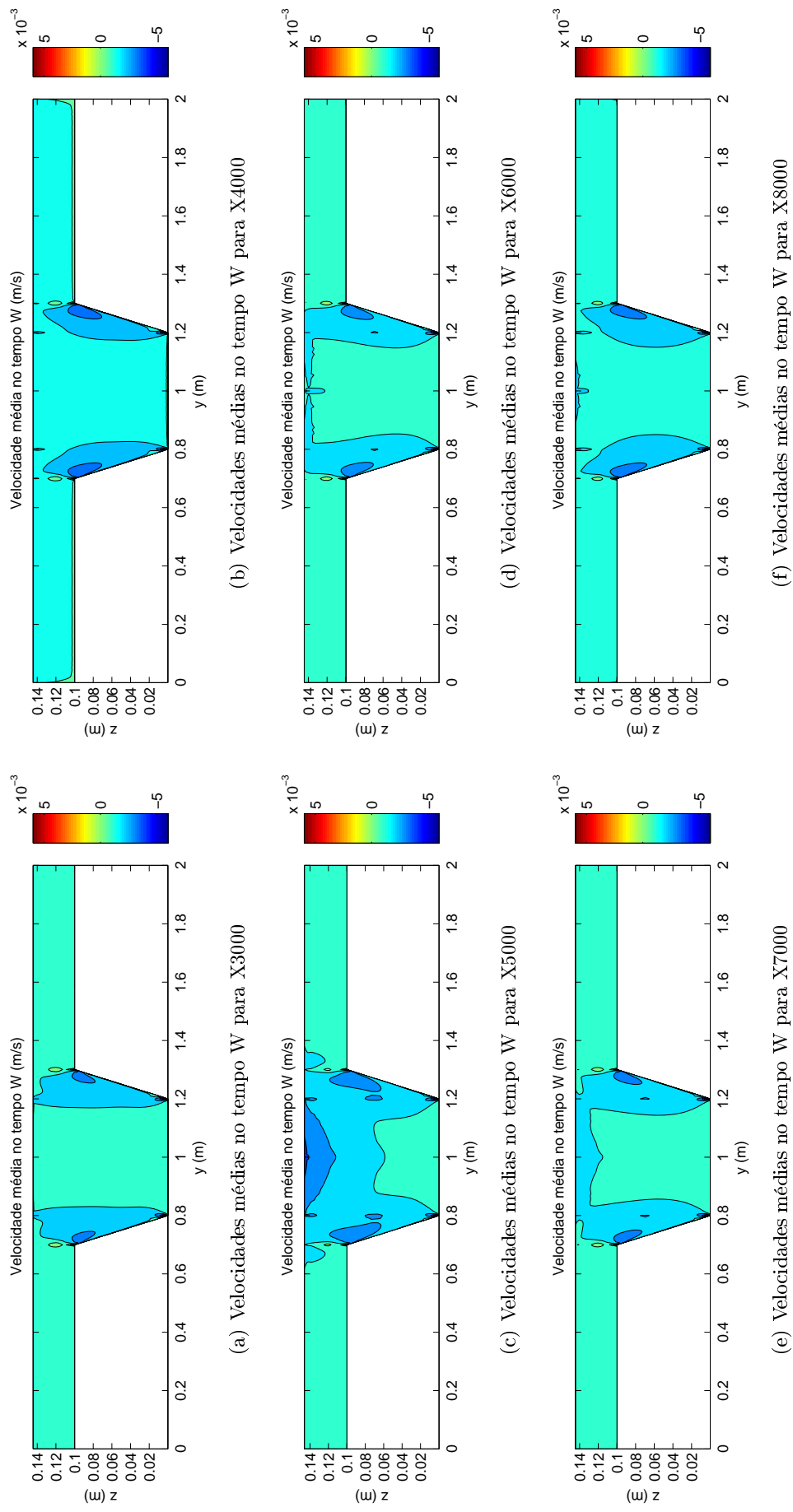


Figura 6.42: Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos em RNU +19%

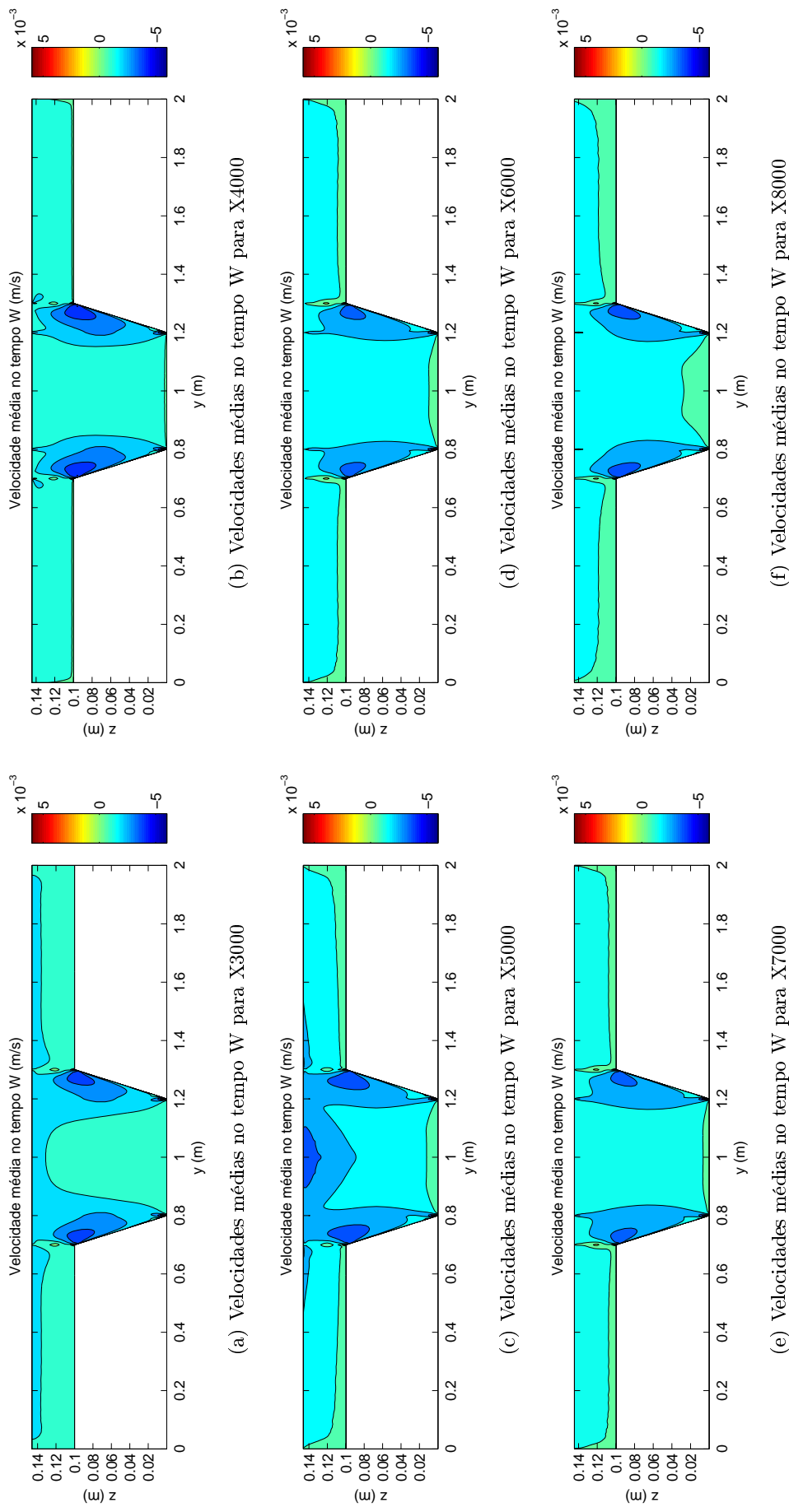


Figura 6.43: Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos para RNU +42%

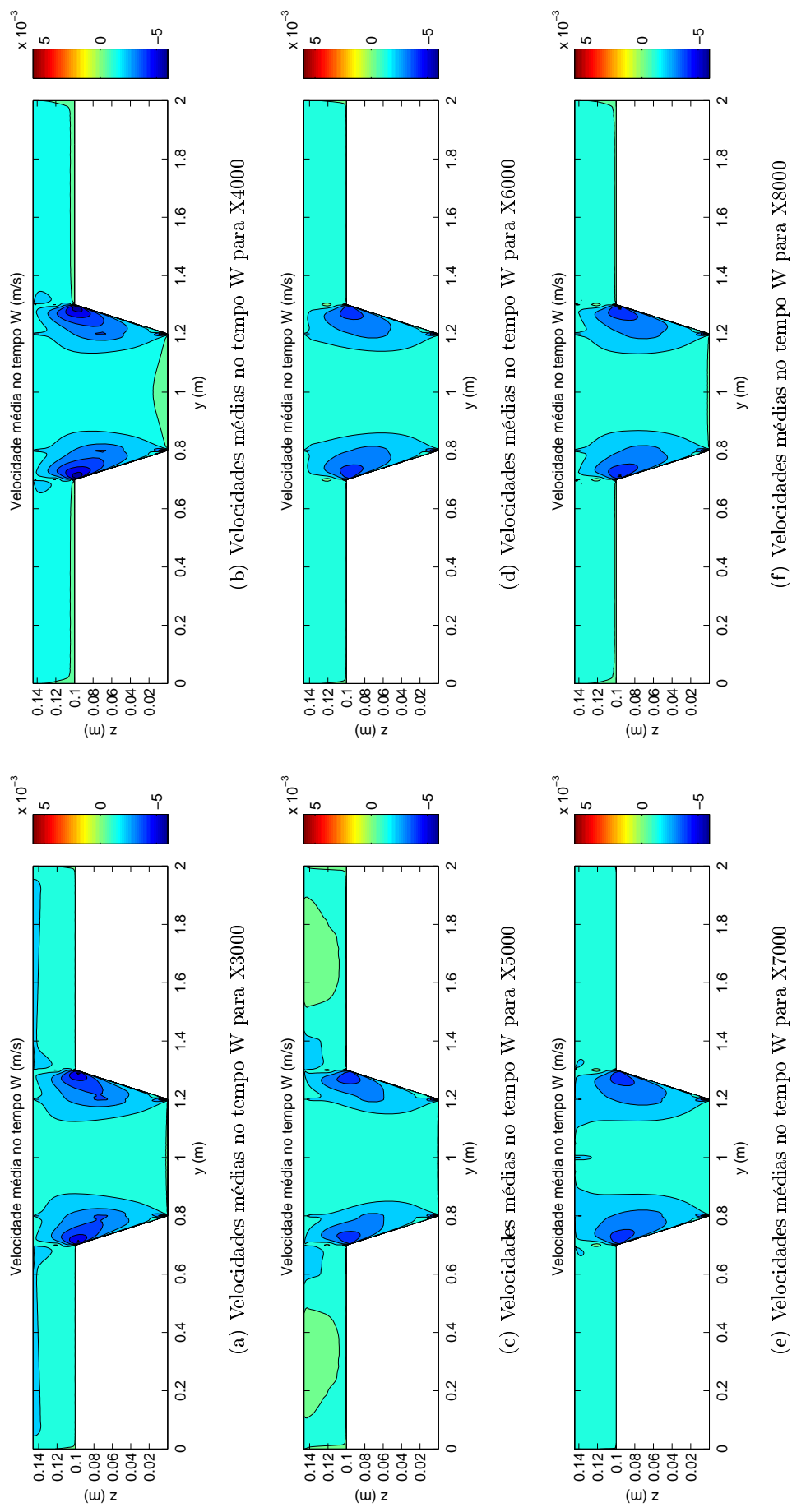


Figura 6.44: Isolinhas das velocidades médias no tempo W para os modelos numéricos para RNU +60%.

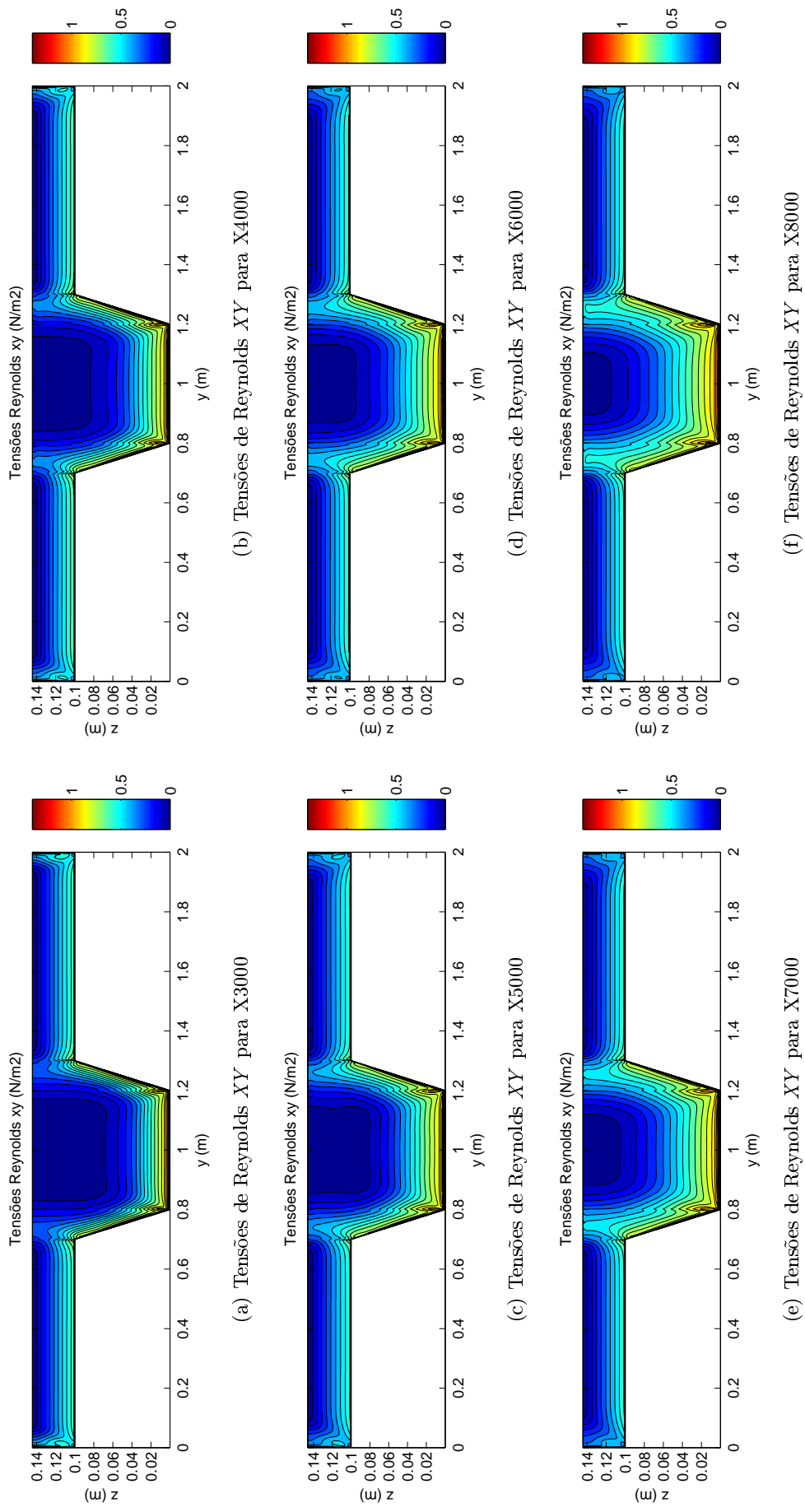


Figura 6.45: Tensões de Reynolds $\overline{u'v'}$ para RNU +19%.

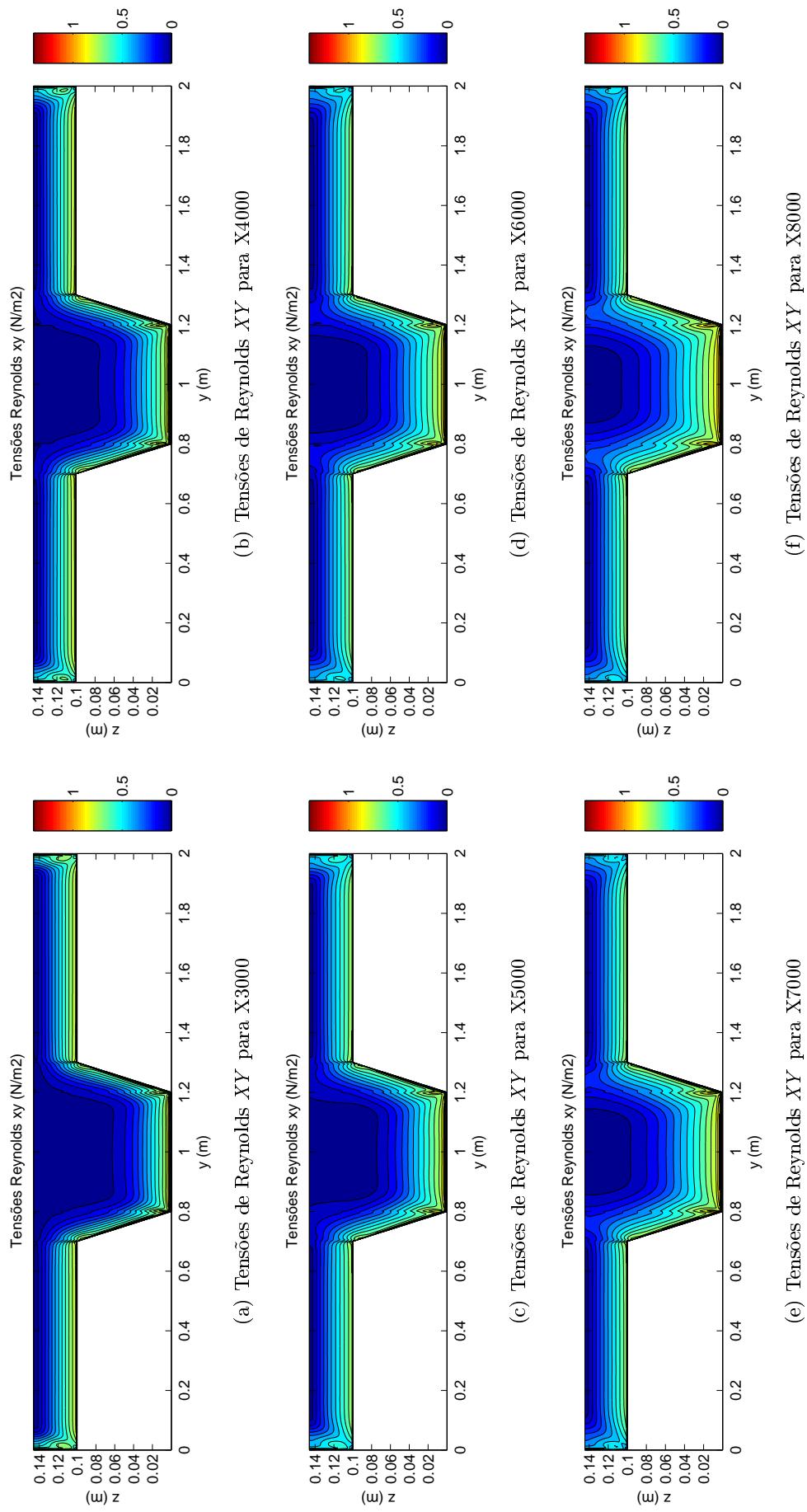


Figura 6.46: Tensões de Reynolds XY para RNU +42%.

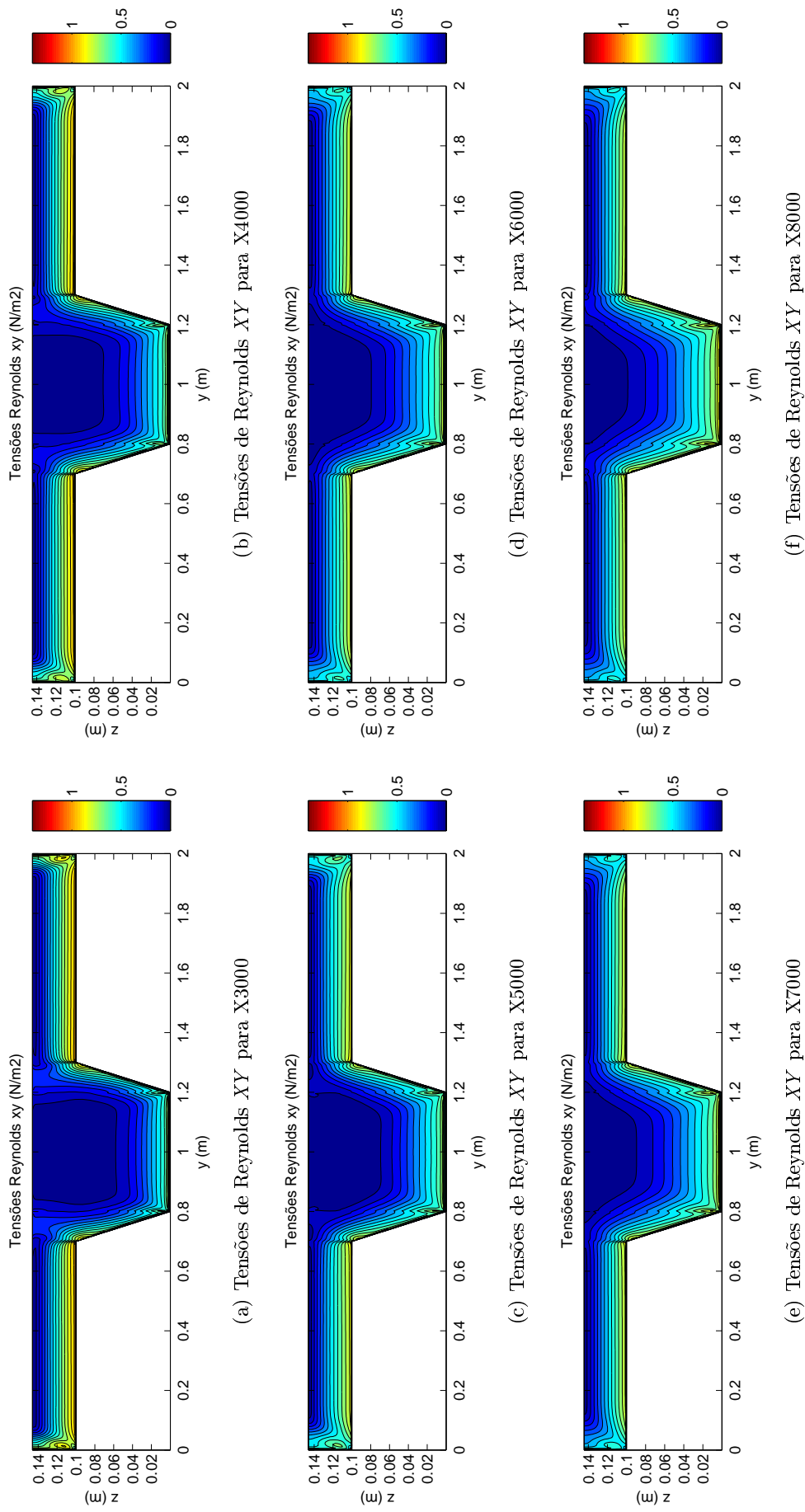


Figura 6.47: Tensões de Reynolds XY para $RNU + 60\%$.

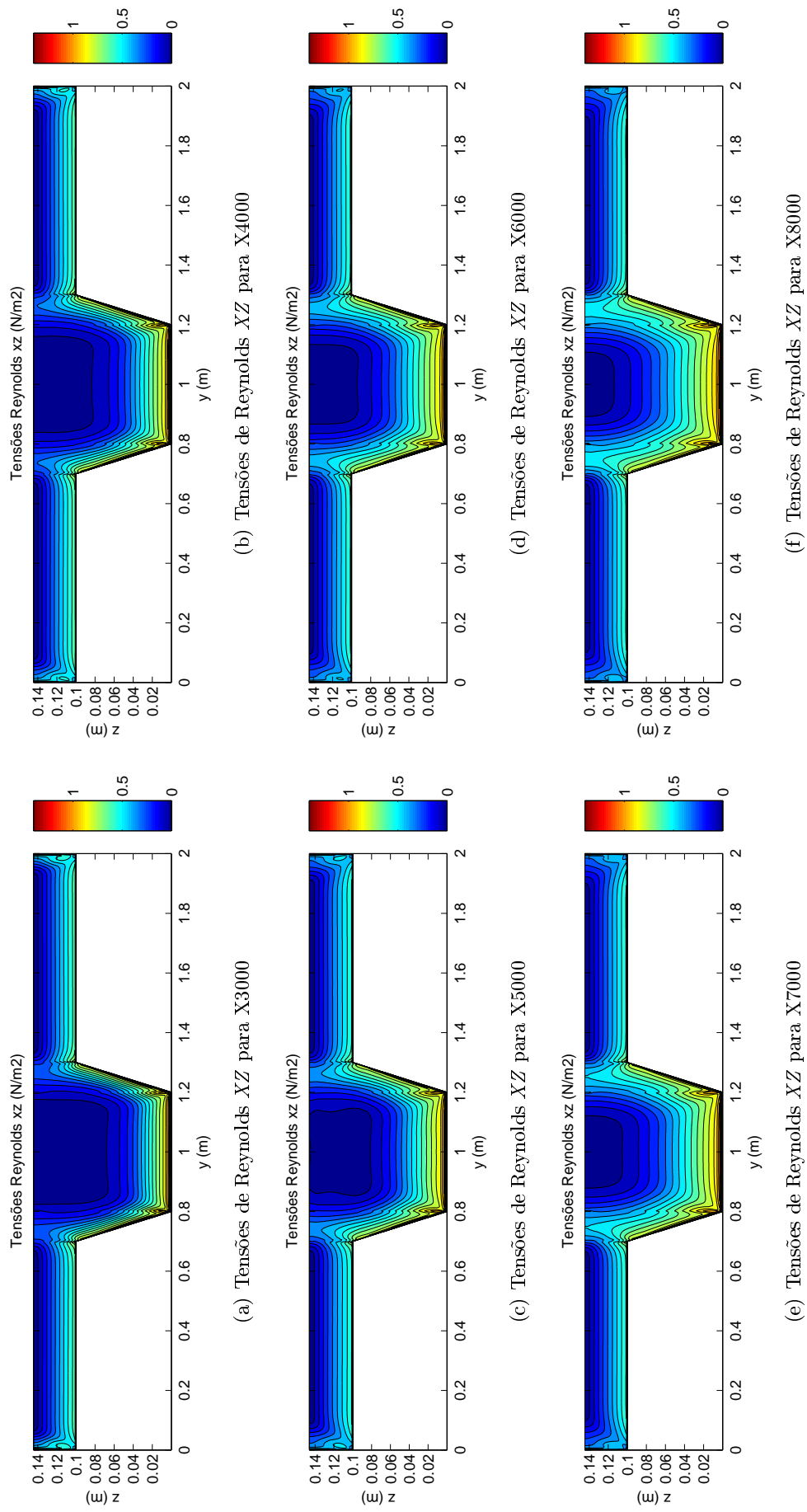


Figura 6.48: Tensões de Reynolds XZ para RNU +19%

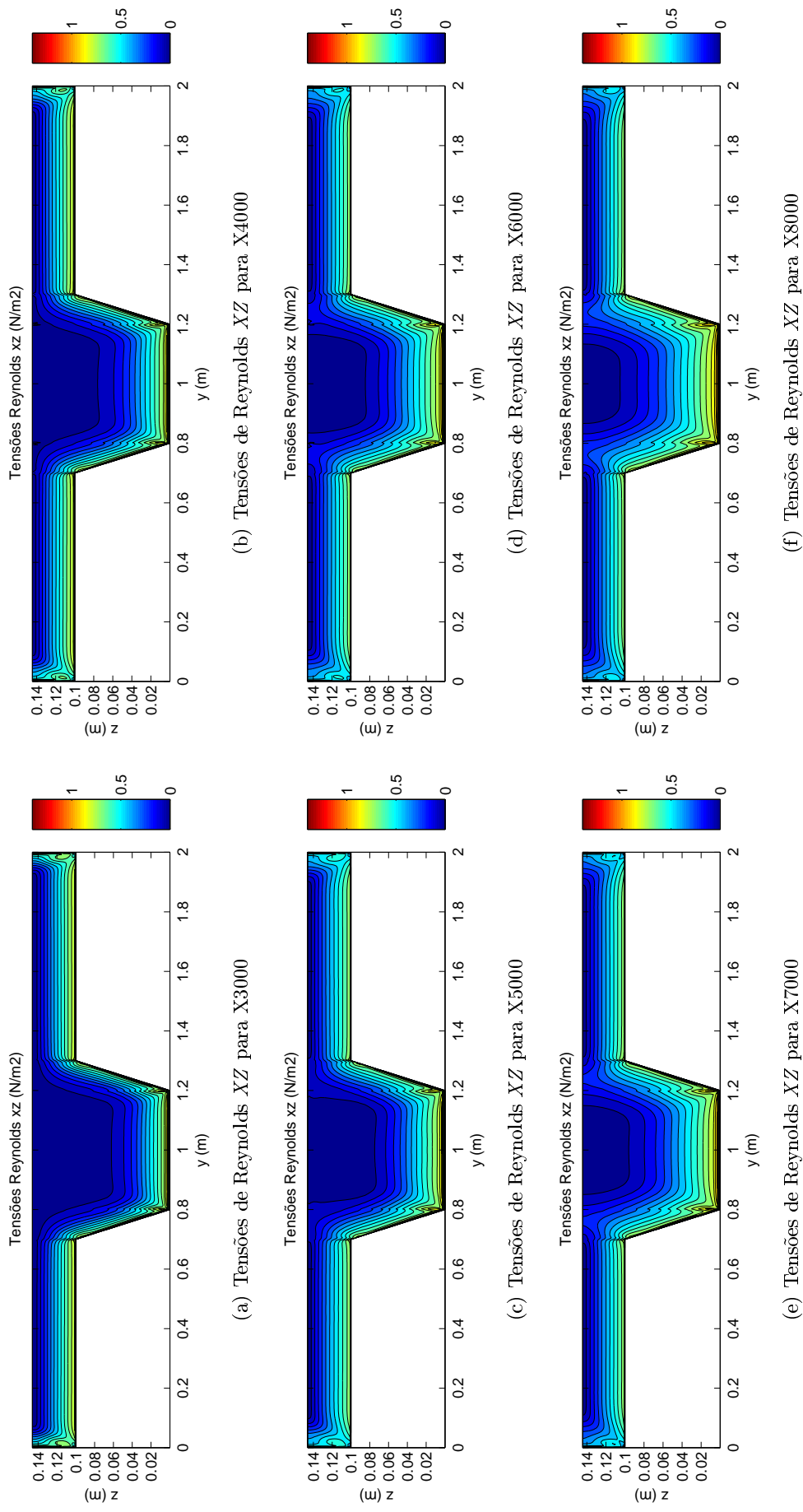


Figura 6.49: Tensões de Reynolds XZ para RNU +42%.

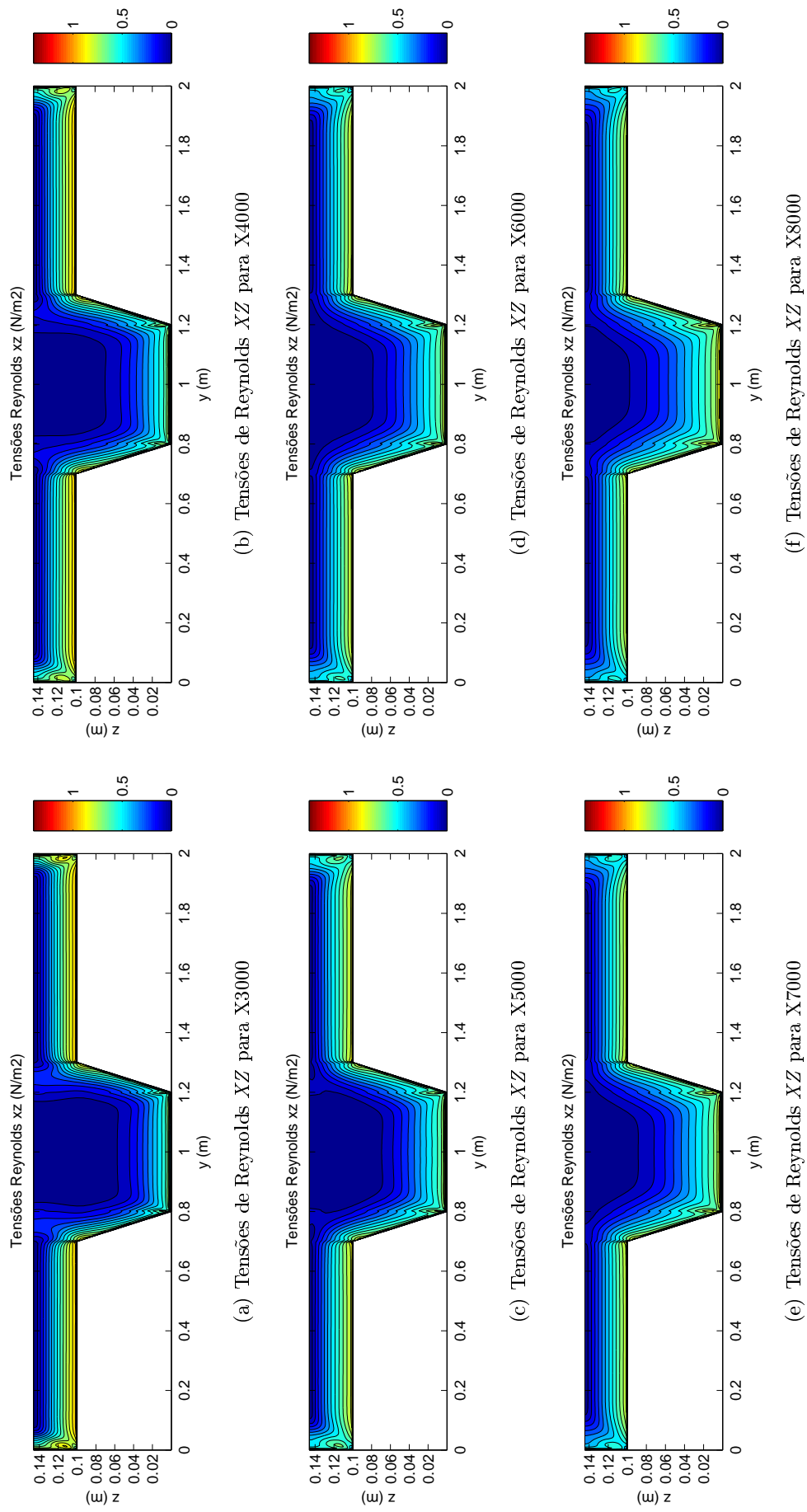
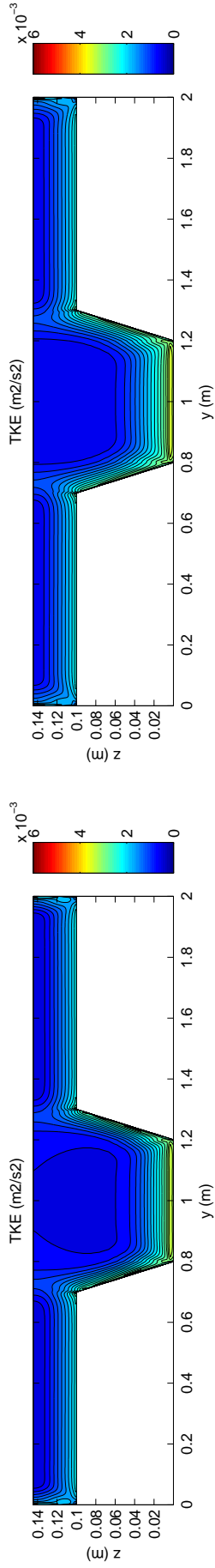
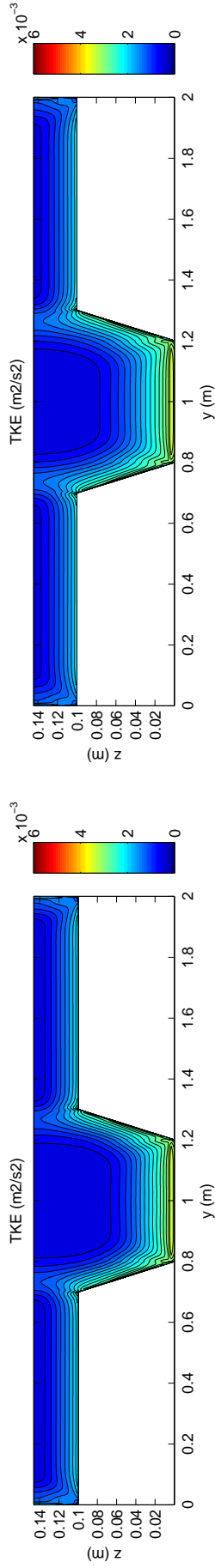


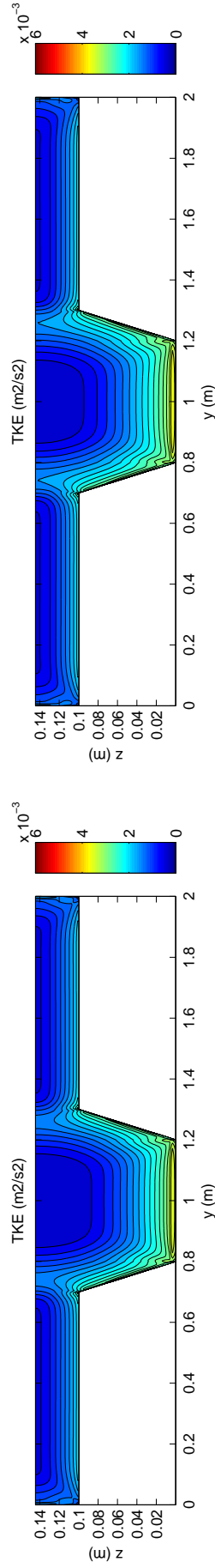
Figura 6.50: Tensões de Reynolds xz para RNU +60%



(b) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X4000

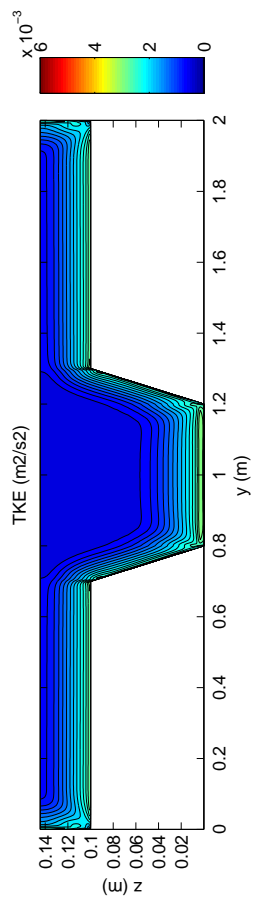


(d) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X6000

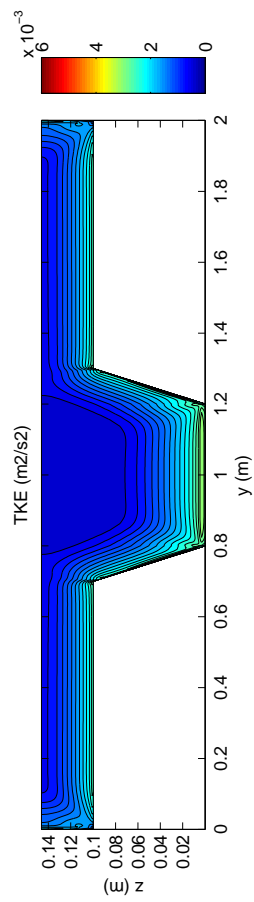


(f) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X8000

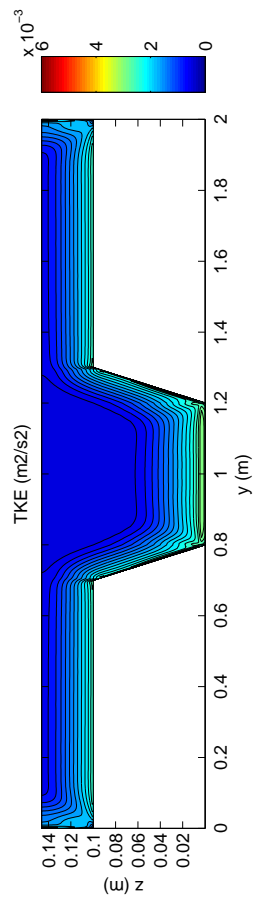
Figura 6.51: Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU + 19%



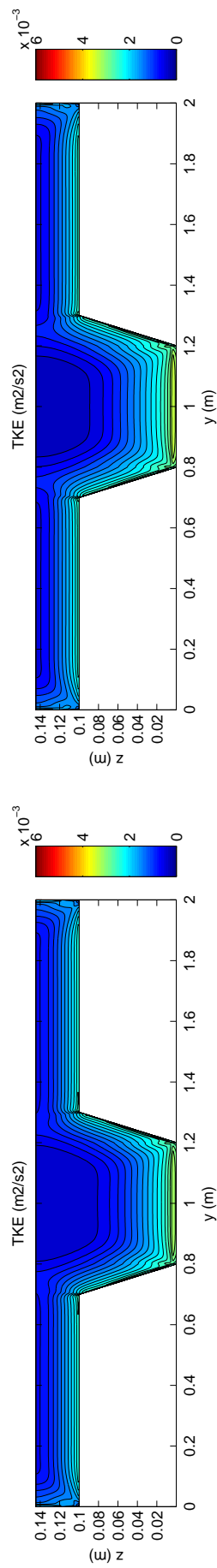
(a) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X3000



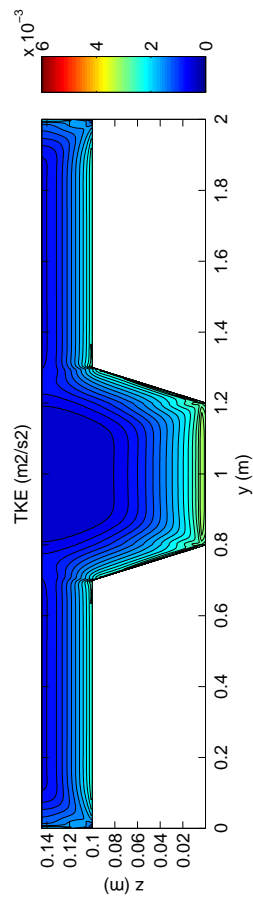
(b) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X4000



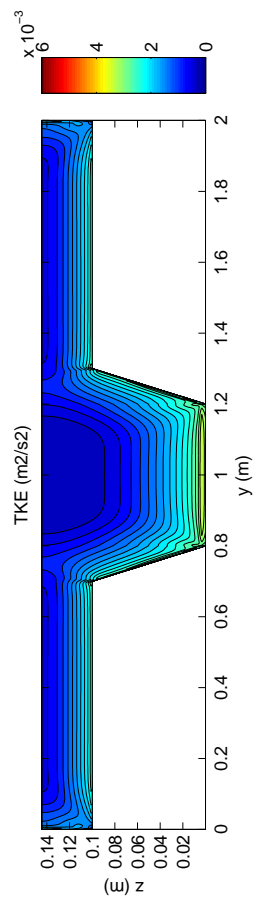
(c) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X5000



(d) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X6000

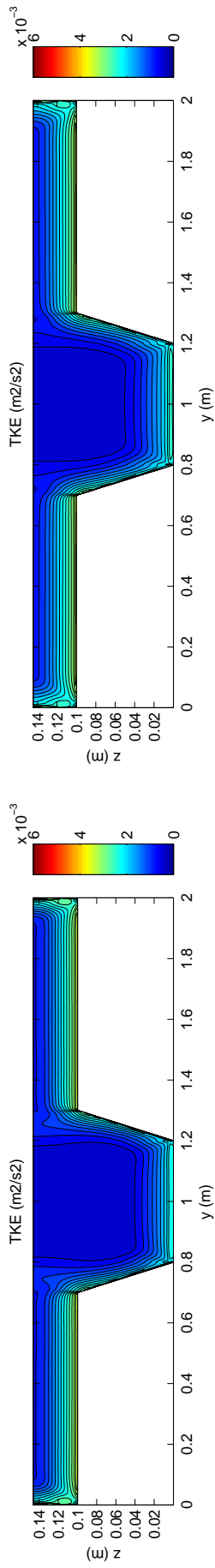


(e) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X7000

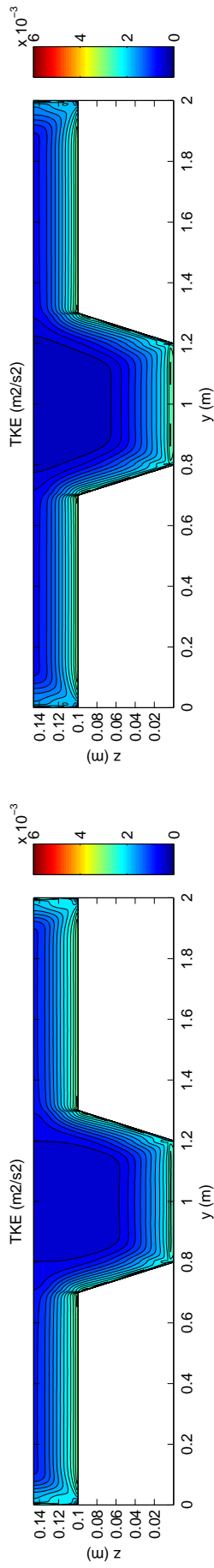


(f) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X8000

Figura 6.52: Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU + 42%.

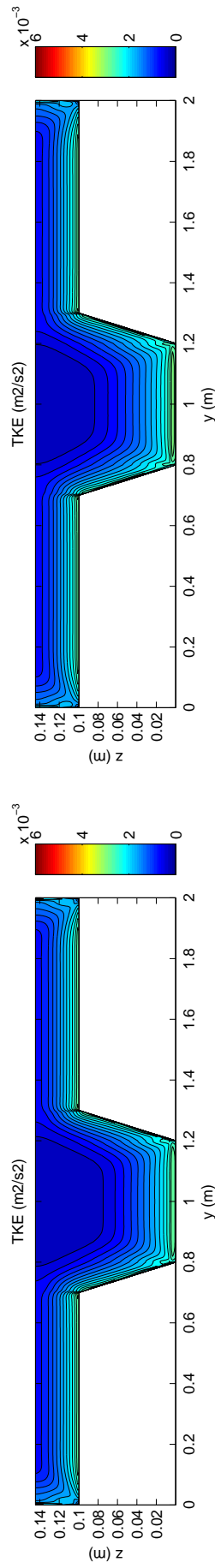


(a) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X3000



(b) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X4000

(c) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X5000



(d) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X6000

(e) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X7000

(f) Isolinhas da energia cinética turbulenta para X8000

Figura 6.53: Isolinhas da energia cinética turbulenta para RNU + 60%

Capítulo 7

Conclusões e propostas para trabalhos futuros

7.1 Conclusões

No presente trabalho apresentou-se um estudo de um modelo numérico tridimensional para um escoamentos do canal de secção composta presente no LNEC onde, previamente já se tinha procedido a estudo experimental. Foi então feita uma comparação das diversas simulações efectuadas entre o modelo numérico e experimental.

Através da análise e interpretação dos resultados pode-se concluir que:

- De um modo geral as velocidades médias no tempo U registaram valores muito próximos dos experimentais ainda que inferiores, ao longo do canal os resultados numéricos aproximam-se cada vez mais dos experimentais, em particular para o LP. Possíveis factores que explicam essas diferenças já foram referidos anteriormente, como o caso da rugosidade ter sido sobrestimada experimentalmente e também a altura de água a jusante.
- O modelo de subdivisão do canal não se revela totalmente compatível para as simulações testadas, apenas para as simulações em regime não uniforme (+19 %, +42% e +60%) foi possível usar o modelo. Para as restantes simulações foi necessário recorrer ao modelo contínuo e a um computador de elevada capacidade pois só assim foi possível simular o modelo completo. O procedimento de subdivisão do canal é bastante vantajoso pois permite que através de computador de uso corrente se proceda a ensaios numéricos com resultados e tempos de cálculos satisfatórios.
- O modelo $k-\varepsilon$ permite simular correctamente a transferência de massa do LP para os LC e dos LC para LP. Mas devido ao comprimento do canal, apenas 10 metros, não é possível a total transferência de massa nas quatro simulações em regime não uniforme.

- As funções de parede do modelo $k-\varepsilon$ permitem simular o desenvolvimento da camada limite. Os resultados numéricos são quase sempre inferiores aos experimentais em especial junto ao fundo, facto que é explicado pela não resolução da subcamada viscosa e pelas aproximações resultantes das funções de parede.
- Os resultados demonstram que a largura da camada de mistura é afectada pelas variações de caudal e respectiva transferência de massa, sendo que nos casos onde essa variação de caudal é maior, demora mais tempo a desenvolver-se pois, existe uma grande velocidade no LP que "anula" os vórtices de larga escala. A largura da camada de mistura é maior nos resultados experimentais.
- Genericamente o modelo $k-\varepsilon$ consegue reproduzir com algum rigor a distribuição transversal da velocidade média em profundidade, apesar dos valores experimentais serem superiores aos numéricos nos LC junto à interface.
- No caso das tensões de arrastamento o modelo $k-\varepsilon$ não foi capaz de as reproduzir para todas as simulações. Nas simulações RU e (-19%) o modelo foi capaz de simular a distribuição das tensões de arrastamento e localizar os seus pontos máximos e mínimos.
- As tensões de Reynolds junto ao fundo do LP aumentam ao longo do canal para todos os regimes estudados, indicando que as variações de velocidade impostas pelas transferências de massa não afectam significativamente o desenvolvimento da camada limite.
- As tensões de Reynolds na interface diminuem ao longo do canal para RU e RNU -19%, devido à diminuição do gradiente de velocidades inicial. Nos regimes RNU com sobrealimentação dos LC a montante, as tensões de Reynolds na interface aumentam ligeiramente para jusante, em consequência do aumento do gradiente de velocidades.
- Para RU e RNU -19% a transferência de massa dos LC para LP provoca a existência de movimento vertical descendente na zona da interface. Este movimento parece confirmar a hipótese de que a massa transferida dos LC para LP não consegue penetrar facilmente no escoamento principal, mergulhando em profundidade.
- Verifica-se que a transferência de massa que ocorre nos RNU afecta o desenvolvimento da camada de mistura e respectivas estruturas turbulentas ao longo da totalidade do canal simulado.
- O programa Ansys aliado ao uso do modelo $k-\varepsilon$ tem algumas limitações, apesar de ser um software comercial exige um grande esforço computacional, limitando desde logo possíveis melhoramentos ao nível da malha e nas dimensões do canal. O programa tem ainda algumas dificuldades na modelação da subdivisão de canais pois, como se pode observar no Capítulo 4 das cinco simulações testadas apenas em três se conseguiu usar o modelo de subdivisão. Para as tensões de arrastamento o modelo $k-\varepsilon$ não conseguiu produzir resultados nos casos em que o canal foi dividido.

7.2 Propostas para trabalhos futuros

- Alterar a malha de modo a verificar a total validação do modelo de partição.
- Utilizar modelos de fecho anisotrópica (por exemplo, modelo $k-\varepsilon$ não linear ou modelos de 2^a ordem) de modo a melhorar os resultados das correntes secundárias e vórtices de larga escala.
- Verificar a influencia da condição de fronteira de jusante impondo variações à altura de água medida experimentalmente.

Bibliografia

- APSLEY, D. & HU, W. (2003). Cfd simulation of two and three-dimensional free-surface flow. *International Journal for Numerical* **43**, 465–491.
- BABAEYAN-KOOPAEI, K., ERVINE, D. A., CARLING, P. A. & CAO, Z. (2002). Velocity and turbulence measurements for two overbank flow events in river severn. *Journal of Hy* **128**, 891–900.
- BISWAS, R. & STRAWN, R. C. (1998). Tetrahedral and hexahedral mesh adaptation for cfd problems. *Applied Numerical Mathematics* **26**, 135–151.
- BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PROUST, S., PAQUIER, A., MOREL, R. & ZECH, Y. (2005). Upstream discharge distribution in compound channel flumes. *Journal of Hydraulic Engineering* **131**, 408–412.
- BOUSSINESQ, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences, Paris.
- BRITO, M. G. (2011). Simulação numérica de escoamentos fluviais em canais de secção composta com vegetação. Tech. rep., Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- CAMPBELL, L. J. (2005). *Double-Averaged open-channel flow over regular rough beds*. Ph.D. thesis, University of Aberdeen, Aberdeen.
- CHOW, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. MacGraw-Hill, New York.
- FERNANDES, J. N., LEAL, J. B. & CARDOSO, A. H. (2011). Discussion of "Apparent friction coefficient in straight compound channels" by J.M. Moreta and J.P. Martin-Vide. *Journal of Hydraulic Research* **48**, 169–177.
- FILONOVICH, M., TIAGO, D., ROJAS-SOLÓRZANO, L. & LEAL, J. G. A. B. (2010). Numerical modelling of compound channels flows using rans. Tech. rep., Instituto de Investigação Cemagref em Lyon, França.
- FRANKE, J., HELLSTEN, A., SCHLUZEN, H. & CARRISIMO, B. (2007). *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Cost Office.
- HARLOW, F. H. & NAKAYAMA, P. I. (1967). Turbulence transport equations. *Physics of Fluids* **10**, 2323–2332.

- HIRT, C. W. & NICHOLS, B. (1981). Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* **39**, 201–225.
- JING, H., GUO, Y., LI, C. & ZHANG (2009). Three-dimensional numerical simulation of compound meandering open channel flow by the reynolds stress model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* **59**, 927–943.
- JOAO FERNANDES (2012). cenas e cou. *journal* **2**, 1–18.
- KOLMOGOROV, A. N. (1942). Equations of turbulent motion of an incompressible fluid. *Akad. Nank. SSR Seriafizicheskaya* **6**, 56–58.
- LANE, S., BRADBROOK, K., RICHARDS, K., BIRON & A.ROY (1991). The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two-dimensional approaches. *Geomorphology* **1**, 1–20.
- LAUNDER, B. E. & SPALDING, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3**, 267–289.
- MASSEY, B. (2002). *Mechanics of Fluids*. Taylor & Francis.
- MORVAN, H., KNIGHT, D., WRIGHT, N., TANG, X. & CROSSLEY, A. (2008). The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1d, 2d e 3d numerical simulation models. *Journal of Hydraulic Research* **46**, 191–208.
- MORVAN, H., PENDER, G., WRIGHT, N. G. & ERVINE, D. A. (2002). Three-dimensional hydrodynamics of meandering compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering* **128**, 674–682.
- NADEN, P., WILSON, C. A. M. E. & SHIONO, K. (2006). Inter-comparison of cfd codes using data from large-scale physical model. *7th International Conference of Hydroinformatics* **2**, 1171–1178.
- NEZU, I. (1994). *Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment*. Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japan.
- NEZU, I. & NAKAGAWA, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. Balkema.
- NEZU, I., ONITSUKA, K. & IKETANI, K. (1999). Coherent horizontal vortices in compound open-channel flows. Tech. rep., Kyoto University, Department of Civil & Global Environment Engineering, Japan.
- NIJS, M. A. J. (2003). *Sensitivity of shallow mixing layers to upstream turbulence*. Master’s thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- OLSEN, N. R. B. (1999). *Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering*.

- PINTO, D. (2010). *Caracterização experimental de escoamento em canais de secção composta*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- POPE, S. B. (2000). *Turbulence Flows*. United Kingdom: University of Cambridge.
- PRANDTL, L. (1945). On a new formation for the fully developed turbulence. Tech. rep., Academy of Sciences Gottingen, Germany.
- PROOIJEN, B. C. V., BATTJES, J. A. & UIJTTEWAAL, W. S. J. (2005). Momentum exchange in straight uniform compound channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering* **131**(3), 175–183.
- RAMESHWARAN, P. & NADEN, P. (2004). Three-dimensional modelling of free surface variation in a meandering channel. *Journal of Hydraulic Research* **42**, 603–615.
- RODI, W. (1993). *Turbulence models and their applications in hydraulics*. Taylor and Francis.
- SAFFMANN, P. G. (1977). Problems and progress in the theory of turbulence. In: *Technical University of Berlin*.
- SHIONO, K. & KNIGHT, D. W. (1991). Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics* **222**, 617–646.
- SOFIALIDIS, D. & PRINOS, P. (1998). Compound open-channel flow modeling with non-linear low-reynolds k-e models. *Journal of Hydraulic Engineering* **124**, 253–262.
- TEIXEIRA, E. (2011). *Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- TIAGO, D. (2011). *Simulação tridimensional de escoamentos fluviais*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- TOMINAGA, A. & NEZU, I. (1991). Turbulent structure in compound open-c flows. *Journal of Hydraulic Engineering* **117**, 21–41.
- WRIGHT, N. G. (2001). Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology: A review of high resolution approaches. Tech. rep., HR Wallingford and the Environment Agency.
- YAKHOT, V., ORSZAG, S. A., THANGAM, S., GATSKI, T. B. & SPEZIALE, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluid - Fluid Dynamics* **4**, 1510–1520.
- YOUNIS, Y. B. (1992). Is turbulence modelling of any use? In: *AIRH Conference. Institution of Civil Engineers, London*.